



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

ULB

Berücksichtigung des Klimawandels bei der Planung und Ertüchtigung wasserbaulicher Anlagen: landesspezifische Regelungen und Empfehlungen

Lücke, Leah
(2020)

DOI (TUprints): <https://doi.org/10.25534/tuprints-00014275>

Lizenz:



CC-BY 4.0 International - Creative Commons, Namensnennung

Publikationstyp: Bachelorarbeit

Fachbereich: 13 Fachbereich Bau- und Umweltingenieurwissenschaften

Quelle des Originals: <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/14275>

Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft

Technische Universität Darmstadt



**Berücksichtigung des Klimawandels bei der Planung und Er-
tüchtigung wasserbaulicher Anlagen: landesspezifische Re-
gelungen und Empfehlungen**

Am Fachbereich Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
der Technischen Universität Darmstadt angefertigte und
beim Fachgebiet für Wasserbau und Hydraulik vorgelegte

Bachelorthesis

von

Leah Lücke

aus Frankfurt a.M. (Matrikelnummer 2643012)

Referent: Prof. Dr.-Ing. habil. B. Lehmann

Tag der Einreichung: 26. Juli 2020

Darmstadt, im Juli 2020

Bachelor-Arbeit für Frau Leah LÜCKE (Matr.-Nr. 2643012)

Berücksichtigung des Klimawandels bei der Planung und Ertüchtigung wasserbaulicher Anlagen: landesspezifische Regelungen und Empfehlungen

Consideration of climate change in the planning and rehabilitation of hydraulic engineering facilities: country-specific regulations and recommendations

Veranlassung und Thema

Die Änderung des weltweiten Klimas hat auch regionale Änderungen von Wetter und Witterung zur Folge (Abb. 1). Dadurch ändern sich auch die Niederschlagsereignisse in ihrer Menge und Intensität, was wiederum Auswirkungen auf das Abflussgeschehen in unseren Gewässern hat. Besonders bei der Planung und der Ertüchtigung flussbaulicher Anlagen sind die Auswirkungen der Klimaänderungen und des Abflussgeschehens zu berücksichtigen. Selbiges gilt – bspw. mit Blick auf den ansteigenden Meeresspiegel oder Sturmflutintensitäten auch für wasserbauliche Anlagen in Ästuaren und an Küstengewässern.

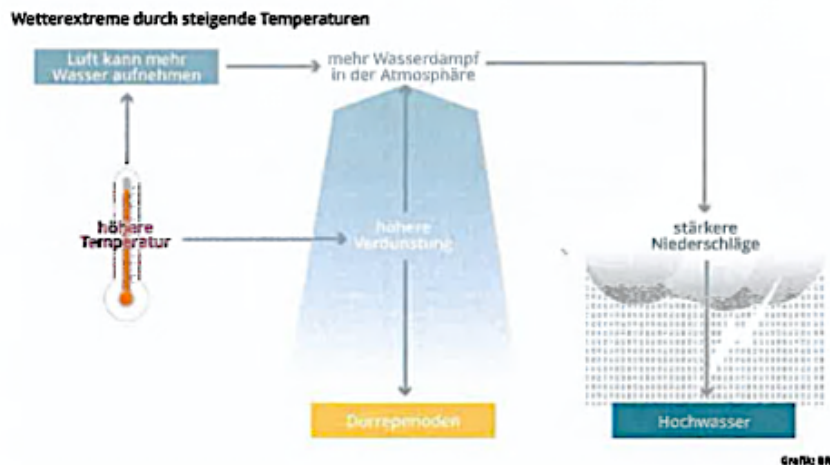


Abb. 1: Der Klimawandel bewirkt primär länger andauernde höhere Temperaturen – die Grafik verdeutlicht einfach einige regionale Folgen davon, welche von wasserwirtschaftlicher Bedeutung sind (Quelle: img.br.de, 20.03.2020)

Aufgabenstellung

Im Rahmen ihrer Bachelorarbeit soll Frau Lücke in einem ersten Abschnitt recherchieren und darlegen, welche wasserwirtschaftlichen Auswirkungen aktuell durch den Klimawandel bereits nachgewiesen sind und darüber hinaus prognostiziert werden.

In einem zweiten Abschnitt soll von ihr dargelegt werden, mit welchen Planungswerkzeugen im Wasserbau diese klimabedingten Auswirkungen bei Neuanlagen oder bei der Sanierung bestehender Anlagen berücksichtigt werden.

Im letzten Abschnitt ihrer Thesis soll Frau Lücke ihre eigene Meinung zu den zusammengetragenen Werkzeugen darlegen und diese aus ihre Sicht bewerten.

Modalitäten

Grundsätzlich gelten die Bestimmungen zu Abschlussarbeiten in der Allgemeinen Prüfungsordnung TU Darmstadt und in der Studienordnung des Fachbereiches 13. Diese Bestimmungen beziehen sich u.a. auf die Aspekte

- Betreuung und Bewertung von Abschlussarbeiten und
- besondere Regelungen bei externen Arbeiten.

Der/die Kandidat/in hat dafür selbstständig Sorge zu tragen, dass diese Bestimmungen eingehalten werden.

Darüber hinaus gelten folgende Randbedingungen:

Referent und Betreuer	Prof. Boris Lehmann FG Wasserbau und Hydraulik Lehmann@wb.tu-darmstadt.de	Empfohlene Kenntnisse	<ul style="list-style-type: none"> - Hydromechanik - Gerinnehydraulik - Naturnaher Wasserbau - Gewässerentwicklung • Hochwasserschutz - Klimawandel
Bearbeitungszeitraum	Auslösung nach Vereinbarung, Leistungszeitraum 4 Monate	Arbeitsbedingungen	Heimarbeit, Ortsbegehungen, Interviews von Experten und Ortskundigen

Darmstadt, den 20.03.2020



Prof. Boris Lehmann

Kurzfassung

Der Klimawandel schreitet voran und die Auswirkungen auf unsere Umwelt zeigen sich immer deutlicher. Auch Fließgewässer unterliegen den Einflüssen des Klimawandels, durch Änderungen im Niederschlagsverhalten und der Temperatur.

Das Ziel dieser Bachelorarbeit ist es, die Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft und die Fließgewässer im Besonderen aufzuzeigen sowie die Anpassungsstrategien der Bundesländer herauszuarbeiten. Dazu wird die folgende zentrale Fragestellung bearbeitet: Welche wasserbaulichen Maßnahmen für die Anpassung an den Klimawandel werden auf Länderebene berücksichtigt?

Um die Forschungsfrage beantworten zu können, wurde Literatur - einschließlich Modellberechnungen, Klimaberichten und rechtliche Regelungen - gesichtet und daraus die wesentlichen Aussagen und Ergebnisse zusammengetragen.

Der Vergleich zwischen den Ländern zeigt große Unterschiede in den Maßnahmenprogrammen. Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz zeigen derzeit mitunter die umfassendsten Anpassungsstrategien auf.

Dies könnte ursächlich an dem bestehenden Kooperationsverhältnis (KLIWA) zwischen diesen Ländern liegen. Durch diese Zusammenarbeit wird viel Wissen generiert und gezielte Anpassungen abgeleitet und vorgeschlagen. Der Konsens ist, dass der Anpassungswille steigt je größer die Informationsmenge und -sicherheit ist. Aus diesem Grund ist es empfehlenswert, dass mehr Länder innerhalb Deutschlands Kooperationsgemeinschaften wie KLIWA gründen.

Schlagwörter: Klimawandel, Wasserwirtschaft, Fließgewässer, Anpassung, Länderebene

Abstract

Climate change is progressing and the effects on our environment are becoming increasingly evident. Watercourses are also subject to the effects of climate change caused by the change of precipitation patterns and temperature.

The aim of this bachelor thesis is to show the effects of climate change on water management and watercourses in particular and to work out the adaptation strategies of the German federal states. For this purpose the following central question will be addressed: Which hydraulic engineering measures for adaptation to climate change are considered at the federal state level?

In order to answer this research question, literature – including model calculations, climate reports and legal regulations – has been reviewed and the essential statements and results have been compiled.

The comparison between the federal states shows great differences in the programmes of measures. Baden-Württemberg, Bavaria and Rhineland-Palatinate are currently showing the most comprehensive adaptation strategies.

This could be due to the existing cooperation relationship (KLIWA) between these federal states. A great deal of knowledge is generated through this cooperation and targeted adaptations are derived and proposed. The consensus is that the greater the quantity and certainty of information, the greater the willingness to adapt. For this reason it is recommendable that more federal states within Germany establish cooperation communities such as KLIWA.

Keywords: Climate change, water management, watercourses, adaptation, German federal states

Inhaltsverzeichnis

ABBILDUNGSVERZEICHNIS	VII
TABELLENVERZEICHNIS	VIII
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	IX
1. EINLEITUNG	1
2. BEOBACHTUNG UND PROJEKTIONEN: KLIMAWANDEL	4
2.1 GLOBALE KLIMAMODELLE	5
2.2 BEOBACHTUNG KLIMA UND KLIMAWANDEL IN DEUTSCHLAND	6
2.2.1 Temperatur	8
2.2.2 Niederschlag	9
2.2.3 Projektionen	11
2.2.4 Starkniederschlag	13
2.3 WASSERHAUSHALT	14
2.4 WASSERWIRTSCHAFTLICHE AUSWIRKUNGEN	15
2.4.1 Hochwasser	16
2.4.2 Niedrigwasser	18
2.4.3 Sturzfluten an Flüssen	19
2.5 ABFLUSSÄNDERUNGEN AN DEUTSCHEN FLÜSSEN	20
2.5.1 Rhein	21
2.5.2 Elbe	25
2.5.3 Donau	27
2.6 WASSERWIRTSCHAFTLICHE HANDLUNGSOPTIONEN	29
3. ANPASSUNGSSTRATEGIEN	32
3.1 RECHTLICHE RAHMENBEDINGUNGEN	32
3.2 LÄNDERSPEZIFISCHE ANPASSUNGSSTRATEGIEN	35
4. DISKUSSION UND EMPFEHLUNGEN	39
5. FAZIT	45
LITERATURVERZEICHNIS	46
ANHANG	53

Abbildungsverzeichnis

<i>Abbildung 1: Der Weg zur Abflussprojektion</i>	<i>4</i>
<i>Abbildung 2: Trends der Temperatur und Niederschlagshöhen in Deutschland (1881-2014), als Abweichung zum Mittelwert des Referenzzeitraumes 1961 bis 1990 (Kaspar & Mächel, 2017) ...</i>	<i>7</i>
<i>Abbildung 3: Mittlere Lufttemperatur im Zeitraum 2011-2015 und die Abweichungen vom Mittelwert 1961-1990 für BY, BW, RP (Steinbauer, et al., 2016).....</i>	<i>8</i>
<i>Abbildung 4: Entwicklung des mittleren Gebietsniederschlags zwischen 1931 und 2015 im hydrologischen Winterhalbjahr (Steinbauer, et al., 2016).....</i>	<i>9</i>
<i>Abbildung 5: Entwicklung des mittleren Gebietsniederschlags zwischen 1931 und 2015 im hydrologischen Sommerhalbjahr (Steinbauer, et al., 2016)</i>	<i>10</i>
<i>Abbildung 6: Veränderung von Temperatur und Niederschlag in Süddeutschland für 2020 - 2050 (Referenzzeitraum 1971-2000) (Komischke, 2013)</i>	<i>12</i>
<i>Abbildung 7: Mittlere Änderung der Tage mit Niederschlägen > 20 mm, für den Zeitraum 2070-2100, im Vergleich zu 1971-2000, pro Jahr. Zurückgezogene Projektionen sind rot durchgestrichen (KLIWA, 2019).....</i>	<i>14</i>
<i>Abbildung 8: Hochwasser bei Deggendorf (Bayern), Isar und Donau, 2013 (Zeit, 2013).....</i>	<i>16</i>
<i>Abbildung 9: Niedrigwasser in Bingen am Rhein (KLIWA, 2020)</i>	<i>18</i>
<i>Abbildung 10: Hydrologische Flussregime in Deutschland (Wolf-Schumann & Dumont, 2012)</i>	<i>21</i>
<i>Abbildung 11: Projizierte Änderung der mittleren monatlichen Temperatur und des Niederschlags (links) sowie des Abflusskoeffizienten (rechts). Modelle: STARS (oben) und ISI-MIP (unten) (Roers & Wechsung, 2015).....</i>	<i>26</i>
<i>Abbildung 12: Abflussregime am Pegel Achleiten für verschiedene Zeitspannen (Klein, et al., 2011).....</i>	<i>28</i>
<i>Abbildung 13: Simulierte Abflussmittel in naher Zukunft (2021-2050) und ferner Zukunft (2071-2100) im Vergleich zu 1961-1990 am Pegel Achleiten (Klein, et al., 2011)</i>	<i>28</i>
<i>Abbildung 14: Resiliente Schutzsysteme für den Hochwasserfall (StMUV, 2014).....</i>	<i>29</i>
<i>Abbildung 15: Übersichtskarte der Rheinpegel und des Einzugsgebietes (IKSR, 2011).....</i>	<i>53</i>
<i>Abbildung 16: Karte des Elbeinzugsgebietes (Roers & Wechsung, 2015)</i>	<i>54</i>
<i>Abbildung 17: Donau Einzugsgebiet bis Pegel Achleiten (Klein, et al., 2011)</i>	<i>54</i>

Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1: Veränderung des Trendverhaltens in den hydrologischen Halbjahren (mittlere Gebietsniederschläge) (in Anlehnung an Steinbauer, et al., 2016).</i>	<i>11</i>
<i>Tabelle 2: Prozentuale Änderungen zwischen den Perioden 1901-1930 und 1971-2000 von SumhN, MQ und MHQ am Rhein (In Anlehnung an IKSr, 2011).....</i>	<i>22</i>
<i>Tabelle 3: Prozentuale Änderung SumhN, MQ, MHQ und Hochwasser (10, 100 und 1000 Jahre) zwischen 1961-1990 und 2021-2050 bzw. 2071-2100 (in Anlehnung an IKSr, 2011).</i>	<i>24</i>
<i>Tabelle 4: Maßnahmen und Instrumente des Aktionsplan Anpassung der Deutschen Anpassungsstrategie und die Adaption der Länder</i>	<i>35</i>
<i>Tabelle 5: Handlungsempfehlungen</i>	<i>43</i>

Abkürzungsverzeichnis

APA	Aktionsplan Anpassung der Deutschen Anpassungsstrategie
IKSR	Internationale Kommission zum Schutz des Rheins
IPCC	The Intergovernmental Panel on Climate Change - Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen
KLIWA	Klimaänderungen und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft - Kooperationsgemeinschaft zwischen: Baden-Württemberg, Bayern, Rheinland-Pfalz und dem Deutschen Wetterdienst

Hinweis zur geschlechtergerechten Sprache

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird auf die gleichzeitige Verwendung der Sprachformen männlich, weiblich und divers (m/w/d) verzichtet. Sämtliche Personenbezeichnungen gelten gleichermaßen für alle Geschlechter.

1. Einleitung

Der Klimawandel infolge anthropogener Einflüsse gehört wohl zu einer der größten Herausforderungen der Menschheit. Die globale Erderwärmung aufgrund einer steigenden Konzentration von Treibhausgasen in unserer Atmosphäre wird in den nächsten Jahrzehnten Einflüsse auf fast alle Bereiche unseres Lebens nehmen.

Bei der Gestaltung unserer gesellschaftlichen Zukunft und Entwicklung muss der globale Klimaschutz und die Klimaanpassung in Politik, Forschung, Technik, Industrie und Landwirtschaft eine zentrale Rolle einnehmen. Ebenso das Verbraucherverhalten hinsichtlich Ernährung, Konsum und Freizeitverhalten wird sich den Herausforderungen nachhaltig stellen und anpassen müssen.

Auch die Wasserwirtschaft wird von den Folgen des Klimawandels beeinflusst. Bei der Planung und Ertüchtigung von wasserbaulichen Anlagen muss vermehrt mit dem Einfluss des Klimawandels gerechnet und geplant werden.

Die folgende Arbeit beschäftigt sich mit den Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft. Auswirkungen, die man heute bereits messen kann und welche für die Zukunft noch projiziert werden. Dabei wird das Hauptaugenmerk auf die Flüsse in Deutschland und im speziellen die Abflüsse gelegt. Die klimatischen Auswirkungen auf Flora und Fauna innerhalb von Gewässern und Stillgewässer im Allgemeinen werden unter der Berücksichtigung des Rahmens dieser Arbeit nicht betrachtet. Auch das Einbeziehen der klimatischen Änderungen der Ost- und Nordsee, wie der Meeresspiegelanstieg, welche einem komplexen Wirkungsgefüge unterliegen, würde den angestrebten Umfang der Arbeit überschreiten und wird deshalb nicht näher betrachtet, trotz der Auswirkungen auf die wasserwirtschaftliche Planung.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, einen deutschlandweiten Überblick über Auswirkungen des Klimawandels in Fließgewässern und der damit verbundenen Herausforderung für die Wasserwirtschaft zu bekommen. Dabei sollen sowohl die in der Vergangenheit beobachteten, auf den Klimawandel zurückzuführenden Ereignisse, als auch die Modellrechnungen für die Zukunft betrachtet werden. Weiter soll in einem Vergleich gezeigt werden, wie die einzelnen Bundesländer bei der Planung und Ertüchtigung von wasserbaulichen Anlagen, die bereits geschehenen und noch projizierten Änderungen einbeziehen. Abschließend wird eine Bewertung und Empfehlung der Planungswerkzeuge vorgenommen, welche bereits verwendet und welche genutzt werden sollten, um auf die Folgen des Klimawandels in Fließgewässern einzugehen.

Die Forschungsfrage der Arbeit lautet: Welche wasserbaulichen Maßnahmen für die Anpassung an den Klimawandel werden auf Länderebene berücksichtigt?

Um diese Frage im Kontext betrachten zu können wurde sie, von den folgenden Fragestellungen eingebettet, beantwortet: Welche Auswirkungen des Klimawandels sind in

Fließgewässern zu erwarten? Sind die länderspezifischen Regelungen und Empfehlungen ausreichend, beziehungsweise welche Empfehlungen können getroffen werden?

Diese Arbeit ist auf Literaturrecherche aus wissenschaftlichen Artikeln und Büchern aufgebaut und bedient sich bereits vorhandenen Informationsquellen. Man spricht bei dieser Methode auch von Sekundärforschung. Dabei gibt es zwei Arten der Vorgehensweise: die Schneeballmethode und die systematische Recherche. Mit der Schneeballmethode wird sich anhand von Fußnoten und Anhängen vorliegender Quellen zu neuen Quellen weitergearbeitet. Bei der systematischen Recherche wird in Datenbanken nach Schlagworten und Schlüsselbegriffen gesucht. Für diese Arbeit wurde mit beiden Methoden gearbeitet: Zunächst wurde systematisch nach Schlüsselbegriffen gesucht und die gefundene Literatur dazu gesichtet. Anschließend wurde mithilfe des Schneeballsystems die Literatur spezifiziert und erweitert. Die Arbeit berücksichtigt Fachliteratur, welche bis zum Mai 2020 veröffentlicht wurde, später veröffentlichte Fachliteratur kann keine Berücksichtigung finden.

Während der Recherchearbeit mussten die Grenzen der Arbeit gesetzt werden, um einen angemessenen Rahmen einhalten zu können. Dabei wurde sich gegen die Berücksichtigung des Meeresspiegelanstiegs an deutschen Küsten entschieden, und für den Fokus auf Hochwasser, Niedrigwasser und Sturzfluten an Flüssen. Aus den gewonnenen Informationen wurden forschungsleitende Fragen und Kategorien entwickelt, anhand derer die Klimawandelproblematik in Fließgewässern und der sich wandelnde Anspruch an wasserbauliche Anlagen aufgezeigt werden soll.

Weiter ist zu erwähnen, dass die Bearbeitung dieser Thesis in der Zeit der weltweiten Corona-Pandemie und den damit einhergehenden Einschränkungen erfolgte. Der sonst übliche persönliche Kontakt und der daraus resultierende Wissensaustausch mit Studierenden, Fachleuten sowie den universitären Instituten und Einrichtungen war nicht gegeben und nur räumlich und zeitlich eingeschränkt über digitale Kommunikationswege möglich. Ebenso war der Zugang zum Präsenzbestand der Universitäts- und Landesbibliothek kaum bis nicht gegeben.

Der inhaltliche Aufbau folgt der gängigen Modellhierarchie (siehe Kapitel 2). Erst werden Änderungen beschrieben, die der „Intergovernmental Panel on Climate Change“ (IPCC) für Europa zusammengetragen und bewertet hat, um im nächsten Abschnitt weiter auf Deutschland einzugehen. Bei der Betrachtung von Deutschland wurde Süddeutschland genauer beschrieben. Die Klimafaktoren „Temperatur“ und „Niederschlag“ haben für die Wasserwirtschaft eine große Bedeutung und innerhalb Deutschlands verfügt man bei beiden Größen über eine gute Datengrundlage. Aus diesen Gründen wurde für beide Faktoren beschrieben welche Änderungen bereits beobachtet wurden und welche Änderungen noch zu erwarten sind.

Weiter werden dann die aus Temperatur und Niederschlag resultierenden Folgen für Fließgewässer genannt: Hochwasser, Niedrigwasser und Sturzfluten an Flüssen. Sturzfluten gehören zu den Hochwassern, aber aufgrund ihrer besonderen Eigenschaften werden sie gesondert betrachtet. Für ein besseres Verständnis werden beispielhaft die Auswirkungen des Klimawandels an den Flussgebieten des Rheins, der Elbe und der Donau gewählt. Die wissenschaftlichen Strategien und Vorschläge zur Anpassung wasserbaulicher Anlagen sind meist weitgehender als die tatsächlich umgesetzten. Aus diesem Grund werden zuerst Vorschläge zur Anpassung aus wissenschaftlicher Sicht beleuchtet, um dann die länderspezifischen Anpassungen gesondert und im Vergleich zum „Aktionsplan Anpassung der Deutschen Anpassungsstrategie“ (kurz: Aktionsplan Anpassung) des Bundes zu betrachten. Vorangestellt an die länderspezifischen Anpassungen wurde ein Einblick in die Normenhierarchie des Wasserrechts. Als Abschluss der Arbeit werden die Länderstrategien kurz bewertet und eine generelle Einschätzung von einzelnen Anpassungsstrategien vorgenommen, sowie eine Handlungsempfehlung ausgesprochen.

Diese Arbeit orientiert sich in großen Teilen an Berichten des Kooperationsvorhabens „Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft“ (KLIWA), welches 1999 von den Ländern Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz sowie dem Deutschen Wetterdienst gegründet wurde.

2. Beobachtung und Projektionen: Klimawandel

Die Entwicklung des Klimas ist genauso ungewiss wie das Wachstum der Weltbevölkerung und der zukünftige Energieverbrauch. Um Aussagen über die Zukunft treffen zu können, werden Modelle benutzt. Für die Abbildung der Auswirkungen des Klimawandels auf Fließgewässer in Modellen braucht es verschiedene Vorstufen (vgl. Abbildung 1).

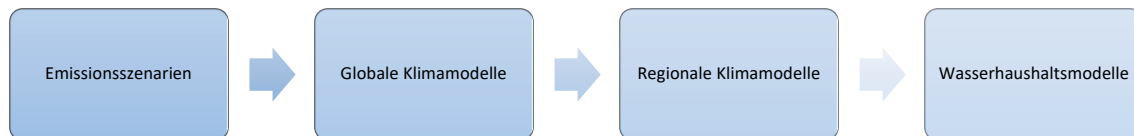


Abbildung 1: Der Weg zur Abflussprojektion

Emissionsszenarien:

Um Entwicklungen und deren Klimafolgen besser abschätzen zu können benutzen Modelle verschiedene, mögliche Szenarien des Emissionsausstoßes. Modelle decken meist alles zwischen „Worst-Case“ und moderaten Szenarien ab. Wichtig ist, dass keine der Angaben bezüglich zukünftiger Änderungen mit hundertprozentiger Sicherheit anzunehmen ist. Die Emissionsszenarien sind in „Representative Concentration Pathways“ (RCP) beziehungsweise bei älteren Szenarien Modellierungen in „Special Report on Emissions Scenarios“ (SRES) eingeteilt und bilden die Ausstöße von Treibhausgasen verschiedener, zukünftiger Entwicklungen des 21. Jahrhunderts ab. (IPCC, 2014a)

Globale Klimamodelle:

Die Erde wird in grobe Raster eingeteilt, sowohl vertikal in der Fläche als auch in der Höhe, um grundlegende Prozesse in der Atmosphäre abbilden zu können. Zunächst bilden globale Klimamodelle historisches Klima ab, sogenanntes Kontrollklima, um auf dessen Basis Prognosen für zukünftige Änderungen machen zu können. Dies geschieht auch unter Berücksichtigung verschiedener Emissionsszenarien. Ausgehend von diesen Emissionsszenarien und verschiedenen Kontrollklimaten bilden die globalen Klimamodelle eine Bandbreite möglicher Entwicklungen ab. (Jacob, et al., 2014)

Regionale Klimamodelle:

Globale Klimamodelle sind oft zu ungenau, um exakte Aussagen für einzelne Länder oder Gebiete treffen zu können. Dafür werden die regionalen Klimamodelle genutzt. Sie verfeinern das grobe Gitternetz der globalen Klimamodelle und können auf spezielle Charakteristika der Regionen eingehen, beispielsweise die Topographie. Erst dadurch wird es möglich auch lokale Klimafolgen aufzuzeigen. (ebd.)

Wasserhaushaltsmodelle:

Die durch Regionalmodelle gewonnenen Daten werden für die Wasserhaushaltsmodelle genutzt und können Klimaänderungen auf wasserwirtschaftliche Bereiche abzeichnen.

2.1 Globale Klimamodelle

Im Folgenden wird sich in Bezug zu den globalen Klimamodellen auf Aussagen des 2014 erschienenen IPCC Report berufen. Der IPCC ordnet und sortiert Ergebnisse der Klimaforschung und bewertet sie wissenschaftlich.

Die bereits beobachteten globalen Folgen des Klimawandels lassen sich anhand von natürlichen Systemen am besten aufzeigen. Die hydrologischen Systeme ändern sich aufgrund der Änderung des Niederschlagsverhaltens und des Schmelzens von Schnee und Eis. Seit circa 1950 ist eine Änderung in den extremen Wetter- und Klimaereignissen zu sehen, welche auf die erhöhten, anthropogen verursachten Konzentrationen von Aerosolen und Treibhausgasen in der Atmosphäre zurückzuführen sind. Diese Änderung drückt sich durch einen Wandel in den Extremtemperaturen, die Zunahme des Meeresspiegels und das vermehrte Aufkommen von Starkniederschlagsereignissen aus. Durch die häufigeren extremen Niederschläge und die daraus resultierenden hohen Abflüsse steigt vielerorts das Überschwemmungsrisiko. Auch der steigende mittlere Meeresspiegel verursacht als Folge von Sturmfluten extremere Meeresspiegel. (IPCC, 2014b)

Prognostiziert wird ein weiterer Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur. Die Gradzahl der Steigung ist jedoch von Modell zu Modell und je nach gewähltem Emissionsszenario unterschiedlich. Wahrscheinlich ist jedoch, dass sie am Ende des 21. Jahrhunderts mehr als 2 Grad betragen wird. Dies wird zu mehr heißen Temperaturextremen führen. Auslöser dafür könnten sowohl anormal hoher Luftdruck über Skandinavien und dem westlichen Zentraleuropa oder auch eine östliche Verschiebung des Azorenhochs mit der Folge von erhöhtem Luftdruck über dem Mittelmeerraum sein, was zu trockenem wolkenlosen Wetter beiträgt (Deutschländer & Mächel, 2017). Zudem ist für trockene Regionen der mittleren Breiten eine Abnahme der mittleren Niederschläge und auf der anderen Seite, für die feuchten Regionen der mittleren Breiten eine Zunahme der mittleren Niederschläge wahrscheinlich. Extreme Niederschläge werden an Häufigkeit und Intensität über die kompletten mittleren Breiten zunehmen. Für das Gletschervolumen sind Rückgänge bis Ende des Jahrhunderts von 85% möglich. Als sehr wahrscheinlich gilt, dass der mittlere Meeresspiegelanstieg in Zukunft mit höherer Geschwindigkeit ablaufen wird, als in dem Referenzzeitraum von 1971 – 2010. Auch wenn sich die mittlere Temperatur der Erde durch getroffene Maßnahmen in Zukunft stabilisieren sollte, wird der Meeresspiegel weiter steigen. (IPCC, 2014b)

Für Städte werden aufgrund des Klimawandels vermehrt Risiken durch Extremniederschläge, Überschwemmungen, Meeresspiegelanstieg und Sturmfluten projiziert (ebd.).

2.2 Beobachtung Klima und Klimawandel in Deutschland

Deutschland hat für das vergangene Jahrhundert größtenteils gut dokumentierte Daten über Temperatur und Niederschlagsmengen. Unvollständige Datenreihen kann man aufbereiten, um sie für Modelle nutzbar zu machen. Im Hinblick auf Fließgewässern sind die Größen „Temperatur“ und „Niederschlag“ bedeutend und werden im Folgenden näher betrachtet. (Kaspar & Mächel, 2017)

In Abbildung 2 werden die Trends der Temperatur und Niederschlagshöhen in Deutschland zwischen 1881 und 2014 in einem Balkendiagramm aufgezeigt. Die Trends beziehen sich dabei jeweils auf die Referenzperiode von 1961 bis 1990. Es zeigt sich, dass die Durchschnittstemperatur in Deutschland zwischen 1881 – 2014 um 1,3 Grad gestiegen ist, was oberhalb des globalen Durchschnittes liegt. Die Temperatur im Winter weist einen linearen Trend von circa $+1,1\text{ °C}$ auf. Ähnlich auch die Temperaturen im Sommer mit $+1,2\text{ °C}$. Allerdings ist der Trend im Sommer hoch signifikant, im Winter nicht. Bei Trends prüft man die positive beziehungsweise negative Entwicklung aufeinander folgender Werte, und kann dies mit der Signifikanzangabe ausdrücken (Bülow, et al., 2012). Auch die Anzahl an Niederschlägen ist zwischen 1881 und 2014 um 10,2% gestiegen, wobei der Anstieg vor allem in den Wintermonaten liegt. In diesen beträgt er 26%. Für die Niederschlagshöhe im Sommer besteht kein Trend über die Gesamtzeit. (Kaspar & Mächel, 2017)

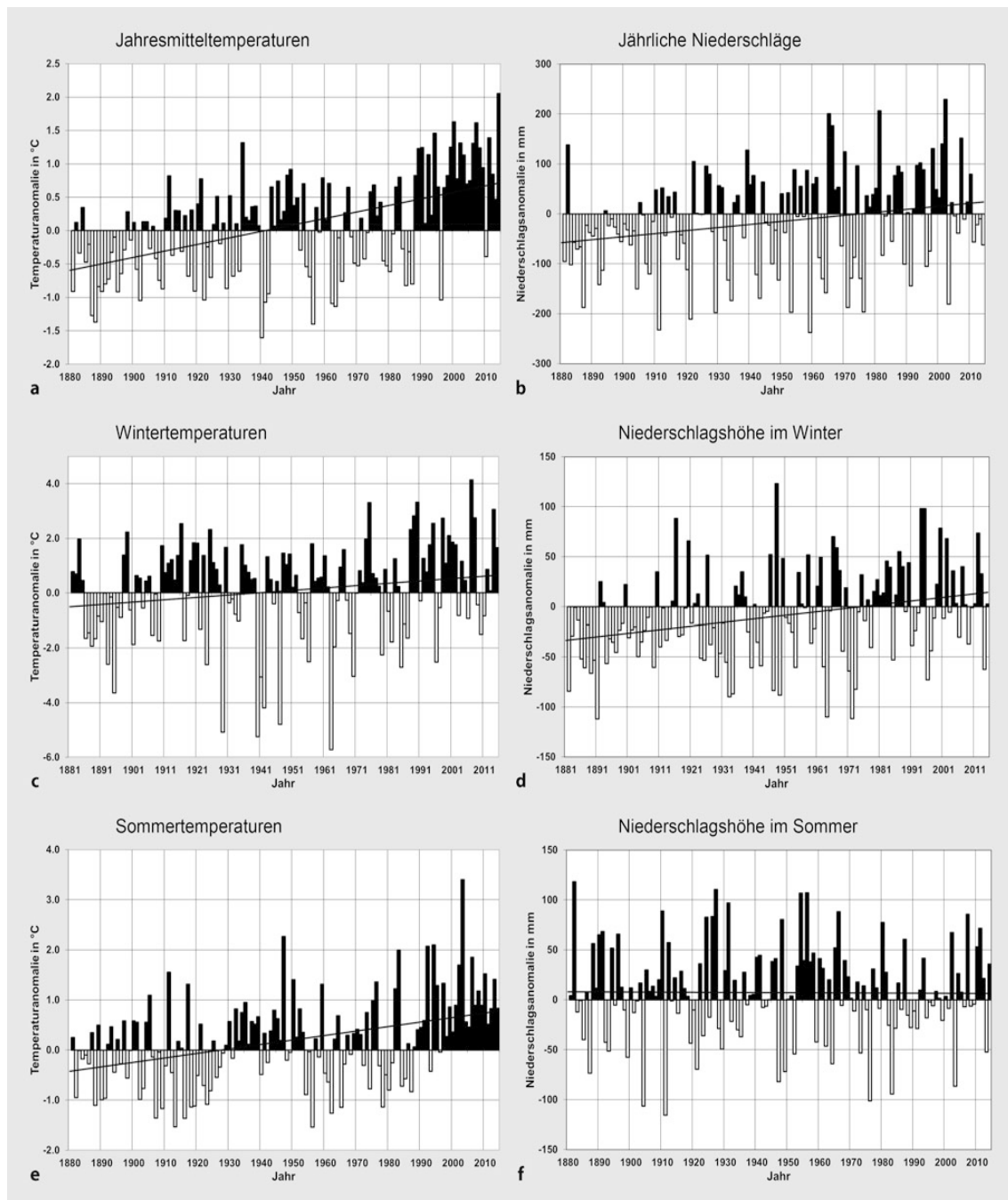


Abbildung 2: Trends der Temperatur und Niederschlagshöhen in Deutschland (1881-2014), als Abweichung zum Mittelwert des Referenzzeitraumes 1961 bis 1990 (Kaspar & Mächel, 2017)

Im Folgenden werden die Temperatur- und der Niederschlagsentwicklung für Süddeutschland näher betrachtet. Der Zusammenschluss KLIWA aus den Ländern Bayern, Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz, sowie dem Deutschen Wetterdienst untersucht die möglichen Auswirkungen der Klimaänderung auf Fließgewässer im Süden Deutsch-

lands. Eine Betrachtung von anderen Länderübergreifenden Regionen kann nicht gemacht werden, da ein solches Kooperationsverhältnis Stand jetzt nur für Süddeutschland besteht.

2.2.1 Temperatur

In Abbildung 3 sind die Temperaturmittel zwischen 2011 – 2015 im Verhältnis zu den mittleren Temperaturen zwischen 1961 – 1990 gezeigt. Die Temperaturen liegen zwischen 8,5 und 10,3 °C und zeigen eine durchschnittliche Steigung von 1,4 °C zur Referenzperiode. Im Vergleich zu der Temperaturperiode fünf Jahre früher (2006 – 2010) ist die mittlere Temperatur in den darauffolgenden fünf Jahren noch einmal um 0,5 °C gestiegen. (Steinbauer, et al., 2016)

In Süddeutschland liegen insgesamt 14 von 15 Jahren zwischen 2001 und 2015 in ihrem Temperaturmittel oberhalb des Temperaturmittels von 1961 – 1990 (ebd.).

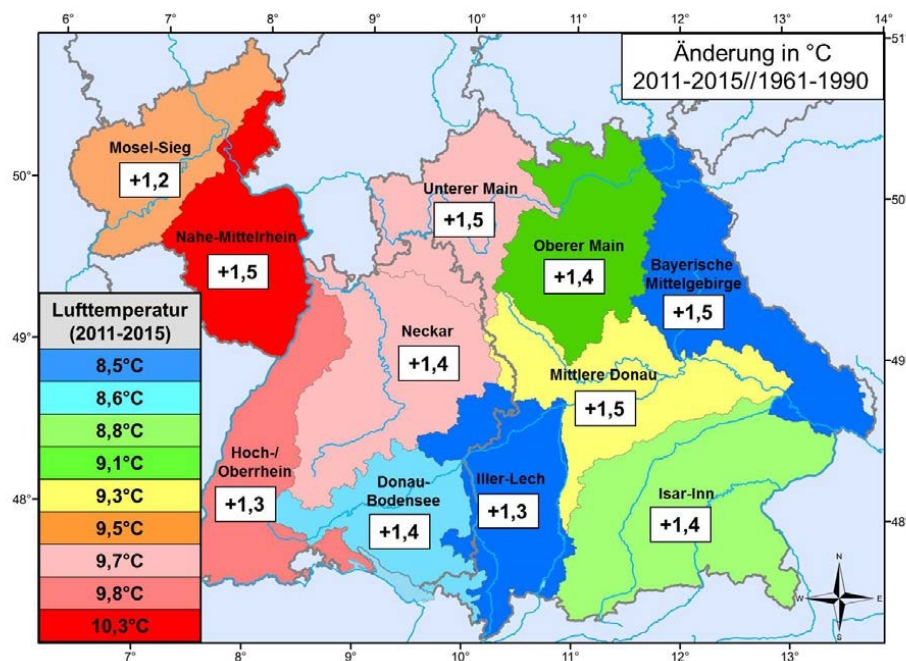


Abbildung 3: Mittlere Lufttemperatur im Zeitraum 2011-2015 und die Abweichungen vom Mittelwert 1961-1990 für BY, BW, RP (Steinbauer, et al., 2016)

Das hydrologische Winterhalbjahr (November – April) in Süddeutschland weist von 1931 bis 2015 einen hoch signifikanten positiven Trend auf. Mit Zunahmen zwischen 1,3 und 1,6 °C/85 Jahre ist der Trend größer als der im Jahresmittel und auch größer als im Sommerhalbjahr. Die Monate Dezember und Januar weisen den stärksten positiven Trend auf, während November und April die geringsten Änderungen im Winterhalbjahr zeigen. (ebd.)

Auch die Temperaturänderungen im hydrologischen Sommerhalbjahr (Mai – Oktober) weisen zwischen 1931 und 2015 einen hoch signifikanten positiven Trend auf. Mit 0,8 bis 1,2 °C/85 Jahre allerdings weniger stark als die Wintermonate. Im innerjährlichen Trendverhalten weist einzig der Monat September keinen positiven Gesamttrend auf. Dies schwächt den Gesamttrend des Sommerhalbjahres. (Steinbauer, et al., 2016)

Um zu prüfen ob es eine Trendänderung gibt, wurden die Zeitreihen 1931 – 2000 und 1946 – 2015 verglichen (jeweils 70 Jahre). Für alle Regionen ergibt sich eine weitere Steigung des positiven Trends, sowohl für das Jahresmittel als auch für die hydrologischen Halbjahre. Die Trendveränderung im Sommerhalbjahr ist mit +1 °C/70 Jahren deutlich größer als im Winterhalbjahr. Trotzdem ist die Gesamttemperaturzunahme im Winterhalbjahr noch größer als im Sommer. Generell lässt sich aber aus dieser Beobachtung ableiten, dass die Erwärmung zwischen 2001 und 2015 im Durchschnitt deutlich zugenommen hat. (ebd.)

2.2.2 Niederschlag

Das hydrologische Winterhalbjahr weist für alle Regionen des KLIWA-Untersuchungsgebiets zwischen 1931 und 2015 einen Anstieg der mittleren Gebietsniederschlagshöhe auf. Allerdings fällt die Stärke dieser Trends mit +2% bis +22% sehr unterschiedlich aus (Steinbauer, et al., 2016). Auch das Signifikanzniveau ist unterschiedlich hoch. In Nord- und Mittel-Bayern sind die höchsten signifikanten Trends, während die Signifikanz für Änderungen in den nördlichen Regionen Baden-Württembergs und in Rheinland-Pfalz vergleichsweise niedrig ist (Vgl. Abbildung 4).

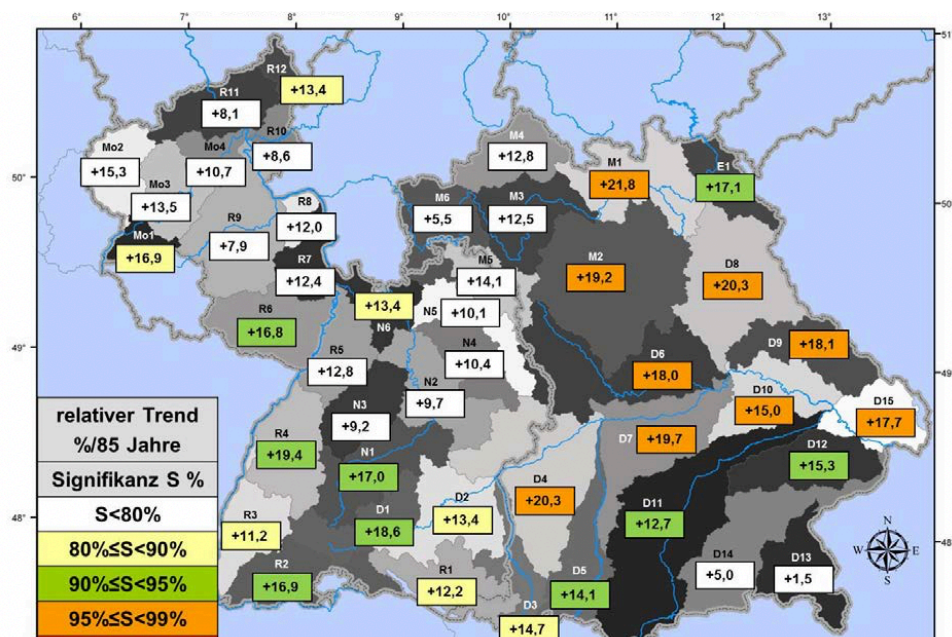


Abbildung 4: Entwicklung des mittleren Gebietsniederschlags zwischen 1931 und 2015 im hydrologischen Winterhalbjahr (Steinbauer, et al., 2016)

Im hydrologischen Sommerhalbjahr sind nur schwache und wenig signifikante Änderungen zwischen 1931 und 2015 aufgetreten. Im Großteil des Betrachtungsgebietes nehmen die Niederschläge ab, Ausnahmen sind der Nord-Osten Bayerns und Rheinland-Pfalz (Vgl. Abbildung 5).

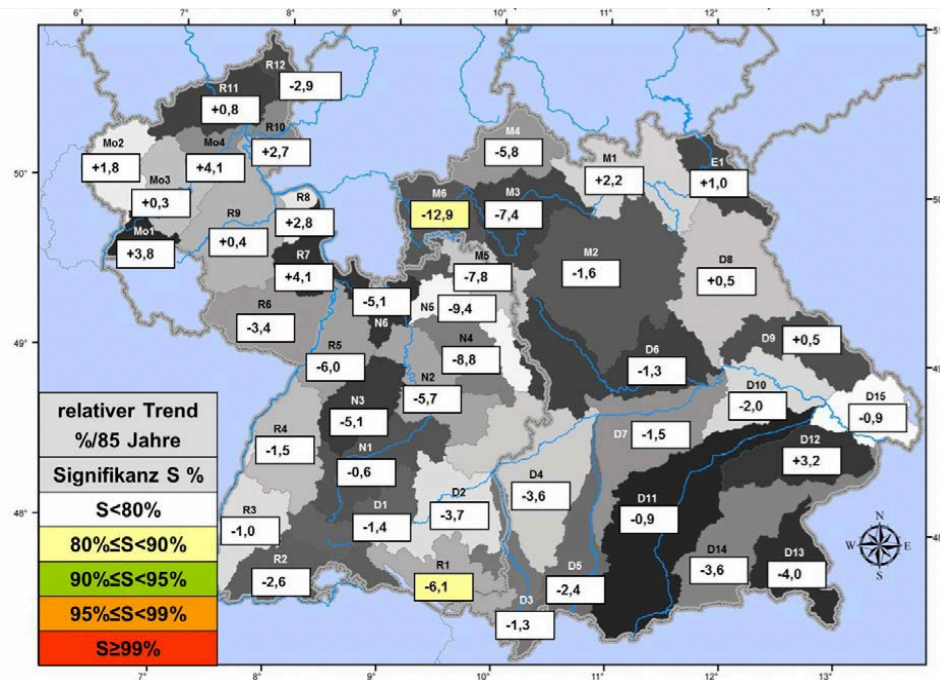


Abbildung 5: Entwicklung des mittleren Gebietsniederschlags zwischen 1931 und 2015 im hydrologischen Sommerhalbjahr (Steinbauer, et al., 2016)

Auch für die Niederschläge wurden, wie bei der Temperatur, gleichlange Zeiträume verglichen, um Trendänderungen zu erkennen. Die 70-jährigen Zeiträume gingen von 1931 bis 2000, 1941 bis 2010 und von 1946 bis 2015 (vgl. Tabelle 1).

Für das hydrologische Winterhalbjahr zeigt sich im Vergleich, dass der Trend zwar weiterhin positiv ist, sich aber langsam abschwächt. Deutlich wird das vor allem in der Signifikanz.

Für das hydrologische Sommerhalbjahr ist ein Trend zu mehr Niederschlag sichtbar. Während die Untersuchungsgebiete 1931 bis 2000 noch größtenteils einen negativen Trend abzeichnen, sind die Zeiträume 1941 bis 2010 und 1946 bis 2015 positiv. Die Interpretation der Ergebnisse für das Sommerhalbjahr muss jedoch vorsichtig gemacht werden, da die Trends nicht signifikant sind. (Steinbauer, et al., 2016)

Tabelle 1: Veränderung des Trendverhaltens in den hydrologischen Halbjahren (mittlere Gebietsniederschläge) (in Anlehnung an Steinbauer, et al., 2016).

Tendenzen der mittleren Gebietsniederschläge	Untersuchungszeitraum		
	1931-2000*	1941-2010*	1946-2015*
Hydrologisches Winterhalbjahr (Nov. – Apr.)			
KLIWA-Untersuchungsgebiete mit abnehmendem Trend / signifikant	- / -	- / -	4 / -
KLIWA-Untersuchungsgebiete mit zunehmendem Trend / signifikant	44 / 43	44 / 37	40 / 7
Hydrologisches Sommerhalbjahr (Mai – Okt.)			
KLIWA-Untersuchungsgebiete mit abnehmendem Trend / signifikant	31 / 3	- / -	- / -
KLIWA-Untersuchungsgebiete mit zunehmendem Trend / signifikant	13 / -	43 / 4	43 / -
*Gesamtzahl KLIWA-Untersuchungsgebiete mit vorliegendem Trend / Anzahl KLIWA-Untersuchungsgebiete mit signifikantem Trend $\alpha \geq 80\%$			

2.2.3 Projektionen

Die oben genannten Beobachtungen zu Temperatur und Niederschlag werden als Referenzwerte für Modelle genutzt, um anhand dieser Projektionen für zukünftige Änderungen abbilden zu können.

Deutschlandweit ist mit einem generellen Anstieg der Temperaturen zu rechnen. Zwischen 2021 und 2050 wird diese Zunahme im Mittel sowohl im Sommer als auch im Winter bei circa 1 °C liegen. Die Temperatur wird auch zwischen 2071 und 2100 weiter ansteigen. Im Winter kann eine Differenz zur Referenzperiode (1971 – 2000) von 5 °C und höher auftreten. Im Sommer dagegen kann die Differenz bei 2,5 °C liegen. (Wolf-Schumann & Dumont, 2012)

Auch den Niederschlägen in Deutschland wird ein weiterer Wandel widerfahren. Winterniederschläge werden auch in Zukunft dem bereits zu beobachtendem Trend folgen und weiter zunehmen. Zwischen 2071 und 2100 werden für Deutschland sehr unterschiedliche Anstiege erwartet, diese können zwischen 10 und 70 % liegen (Referenzzeitraum 1971 – 2000). (ebd.)

Im Sommer wird ein negativer Trend in Deutschland erwartet. Bereits zwischen 2021 und 2050 wird es regional unterschiedliche Abnahmen der Sommerniederschläge geben: Maximale Abnahmen von bis zu 25% können erreicht werden. Zwischen 2071 und 2100 werden Abnahmen in dieser Höhe in ganz Deutschland auftreten. (ebd.)

Zu Süddeutschland sind Projektionen bis 2050 für Temperatur und Niederschlag vorhanden. Diese beziehen sich auf den Referenzzeitraum 1971 – 2000 und bilden voraussichtliche Veränderungen zwischen 2020 und 2050 ab (vgl. Abbildung 6).

Die Temperaturänderung wird hier im Vergleich zu ganz Deutschland leicht höher eingeschätzt, bis zu einem Maximum von +2,1 °C. Anders als die Niederschlagsänderungen: Für diese werden in den Sommermonaten Abnahmen bis 15% aufgezeigt, was unterhalb der zu erwartenden Änderung für Gesamtdeutschland liegt. (Komischke, 2013)

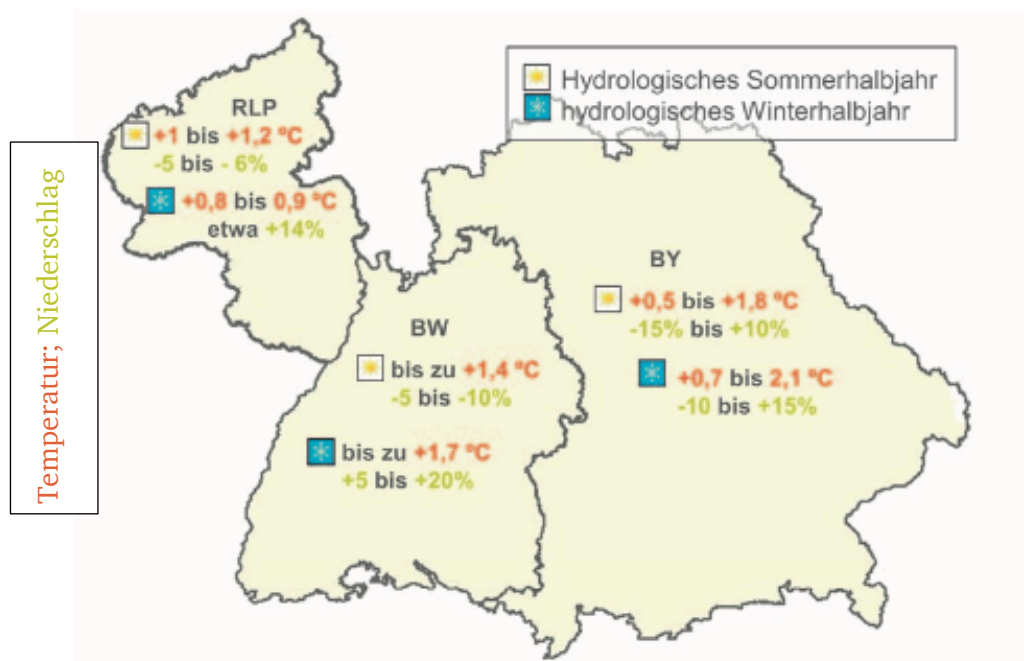


Abbildung 6: Veränderung von Temperatur und Niederschlag in Süddeutschland für 2020 - 2050 (Referenzzeitraum 1971-2000) (Komischke, 2013)

Durch die länderspezifischen Unterschiede der KLIWA-Regionen, bei denen die projizierten Änderungen innerhalb der Projektionsgrößen Differenzen von bis zu 25% abbilden und die dazukommenden Unterschiede in Bezug auf Gesamtdeutschland, werden die Unsicherheiten und Komplexitäten von Klimaprognosen deutlich. Die länderspezifischen Unterschiede zeigen sich in der Topographie, der Landnutzung und der natürlichen Vegetation.

Für die Ergebnisse ist es immer von Bedeutung, welche Emissionsszenarien gewählt wurden, und welche anderen regionsabhängigen Einflüsse noch betrachtet werden. Zudem hängen die Ergebnisse der Modellrechnungen auch von der gewählten Referenzperiode ab.

2.2.4 Starkniederschlag

Neben der Betrachtung der mittleren Gebietsniederschläge zeigt sich auch bei Starkniederschlagsereignissen ein Trend, der auf die Klimaänderung zurückzuführen ist. Starkniederschlag oder Starkregen ist definiert über eine große Niederschlagsmenge pro Zeiteinheit. Diese Variablen können verschieden definiert werden. Der Deutsche Wetterdienst warnt ab $15 \text{ l/m}^2\text{h}$ oder ab 20 l/m^2 innerhalb von 6 Stunden vor Starkregen. (DWD, 2020)

Für das KLIWA Einzugsgebiet, wurden zwischen den Jahren 1931 und 2015, die halbjährlichen Maximalwerte der eintägigen Gebietsniederschlagshöhen für die Auswertung der Starkniederschlagsänderung genommen. Für das Winterhalbjahr werden in diesem Zeitraum für Süddeutschland zunehmende bis stark zunehmende maximale eintägige Gebietsniederschlagshöhen beobachtet. Ausnahme sind sechs der 44 Untersuchungsgebiete, in denen eine nicht signifikante Abnahme stattgefunden hat. Am höchsten sind die Zunahmen im Nord-Osten von Bayern mit Zunahmen zwischen 27 und 33 %. In Rheinland-Pfalz und den meisten Teilen von Baden-Württemberg sind vor allem nicht signifikante Änderungen zu sehen. Eine signifikante Zunahme von bis zu 17 % tritt im Süden Baden-Württembergs auf. (Steinbauer, et al., 2016)

Im Sommerhalbjahr ist für den Zeitraum 1931 bis 2015 ebenfalls eine Zunahme der Starkniederschläge zu verzeichnen. Nur 17 von 44 Untersuchungsgebieten zeigen abnehmende Trends. Davon ist einzig die Abnahme von fast -23% im Mainseinzugsgebiet in Bayern signifikant. Die Zunahmen in Baden-Württemberg im Oberlauf von Rhein, Neckar und Donau sind allesamt signifikant. (ebd.)

Durch die steigende Lufttemperatur ist davon auszugehen, dass auch in Zukunft ein positiver Trend der Starkniederschläge zu beobachten sein wird. Da das Potenzial von Starkniederschlägen allerdings nicht nur durch die Lufttemperatur, sondern auch durch atmosphärische Zirkulation bestimmt wird, können generelle positive Trends in einigen Regionen gedämpft oder sogar in einen negativen Trend umgekehrt werden. In der Nordhemisphäre hat sich die Stabilität beziehungsweise die Verweildauer von Wetterlagen erhöht und wird sich wahrscheinlich auch in Zukunft erhöhen, wodurch Wettersituationen mit Starkregen begünstigt werden. Diese können dann länger anhalten. In Abbildung 7 sind Projektionen verschiedener Modelle für die Trends von Starkregen für das Ende des 21. Jahrhundert aufgezeigt. Unter anderem durch die Rücknahme der Modelle, welche eine Abnahme projizierten, ist ein klarer Trend zu mehr Starkregenereignissen erkennbar. (KLIWA, 2019)

- Schneedecke: Die Schneedeckendauer ist zwischen den Jahren 1952/53 und 1995/96 deutlich gesunken. Am größten ist die Abnahme in geringen Höhen. Höhen kleiner als 300 m über NN haben einen Rückgang von 40% erfahren, zwischen 300 m und 800 m über NN sind es 10 – 20%. Aufgrund des häufigeren Auf- und Abbaus der Schneedecke kommt es vermehrt zu kleineren Hochwassern und die Abflussspitze des nivalen Abflusses verschiebt sich in die Wintermonate hinein. (Günther, 2004)
- Gebietsniederschläge: Bei einer Zunahme der Gebietsniederschläge würde es als Rückschluss auch eine Zunahme der Abflüsse geben (Bormann & Casper, 2016). In Bayern und Baden-Württemberg wurde keine direkte Zunahme der pro Jahr gefallenen Niederschläge beobachtet, aber eine Verschiebung in die Extreme der Niederschlagsereignisse. Sowohl Tage an denen es komplett trocken ist, als auch Tage an denen viel Niederschlag fällt, haben zugenommen. (Günther, 2004)
- Starkniederschlagshöhen: Durch höhere Niederschlagsintensitäten kommt es schnell zu einer Übersteigung des Infiltrationsniveaus, was wiederum zu einem höheren Abfluss führt (Bormann & Casper, 2016). Für Bayern und Baden-Württemberg haben die Starkniederschlagshöhen in einem Zeitraum zwischen 1931 – 2000 tendenziell im hydrologischen Winter zugenommen (Günther, 2004).

Alle diese Größen stehen eng miteinander in Verbindung und sind stark voneinander abhängig. Aus diesem Grund werden für Analysen meist die Größen mit der höchsten Variabilität betrachtet: Niederschlag und Abfluss. (Bormann & Casper, 2016) Abflussmodelle betrachten oft nur die Parameter „Niederschlag“ und „Temperatur“.

Obwohl es Unterschiede in den Modellen und Ergebnissen der prognostizierten Änderungen im Wasserkreislauf gibt, sind sich die Wissenschaftler aber darüber einig, dass durch steigende Treibhausgase die Wasserkreisläufe verändert werden (Mudelsee, 2017).

2.4 Wasserwirtschaftliche Auswirkungen

Die durch die Klimaänderung hervorgerufenen Herausforderungen für die Wasserwirtschaft sind komplex und umfassen mehrere Themengebiete. Folgend wird sich auf die Herausforderungen in Flüssen durch verändertes Abflussverhalten konzentriert. Diese umfassen Hochwasser und Niedrigwasser. Im Bereich der Hochwasser wird nochmals gesondert auf Sturzfluten in Flussgebieten eingegangen, da diese von den Rahmenbedingungen der allgemeinen Hochwasser abweichen. Eine kurze Erläuterung des Begriffs und der damit verbundenen Problematik, gefolgt von beobachteten und prognostizierten Änderungen, sowie die Gefahren und Schadenspotentiale der Abflussextrême sollen einen Überblick über die Auswirkungen der Klimaänderung geben.

Generell sind Aussagen über die Entwicklung von zukünftigen Abflussextrêmen weniger belastbar, als Aussagen über zukünftige mittlere Abflüsse (IKSR, 2011). Deswegen wird

kurz über die Beobachtung der KLIWA Regionen und des Landes Hessen in Bezug auf die mittleren Abflüsse eingegangen.

Die Kooperation KLIWA und das Land Hessen haben an insgesamt 16 Pegeln (verteilt an: Iller, Isar, Donau, Kinzig, Rhein, Neckar, Main, Nidda, Nahe, Lahn, Sieg, Fulda und Eder) Abflussuntersuchungen durchgeführt und Prognosen über den Abfluss getroffen, welche im Folgenden unter Betrachtung der Abflussexremen erläutert werden. Allgemein zeigt sich, dass an 75 % der Abflusspegel zwischen 1931 und 2015 der mittlere Abfluss (MQ) im Winterhalbjahr steigt und an 70 % der Abflusspegel im Sommerhalbjahr abnimmt. Seit 2000 wächst die Anzahl der Pegel, welche im Sommerhalbjahr eine Abnahme von MQ verzeichnen. (KLIWA, 2018a)

2.4.1 Hochwasser

Hochwasser entstehen durch langanhaltenden, großräumigen Niederschlag, aufgrund von Schneeschmelzen oder in Folge von Regen, der auf gesättigte und/oder versiegelte Böden trifft (Bronstert, et al., 2017). In Abbildung 8 sieht man den bayrischen Landkreis Deggendorf, der 2013 massiv von den Hochwassern in Isar und Donau betroffen war (Zeit, 2013).



Abbildung 8: Hochwasser bei Deggendorf (Bayern), Isar und Donau, 2013 (Zeit, 2013)

Das Hochwasserrisiko ergibt sich aus dem wahrscheinlichen Eintreten des Hochwassers und aus dem verbundenen Schadenspotential. Das Schadenspotential bzw. das Risiko, hängt von Objekten im Gefährdungsbereich und deren Vulnerabilität ab. Der Begriff des Hochwasserrisikos bezieht sich demnach auf Szenarien, wenn Schutzanlagen an ihre Belastungsgrenze kommen und entweder Versagen, oder der Überlastfall (Hochwasser größer als die Ausbaumenge) eintritt. (Schwetz & Überwimmer, 2015) So kann ein Hoch-

wasserrisiko nie komplett eliminiert, aber mit den richtigen Anpassungen gesenkt werden. Typische Auslöser sind der Verschluss von Fließgewässerquerschnitten, Rückstau, Abflussbehinderung oder das Versagen von Hochwasserschutzanlagen. (Bronstert, et al., 2017)

In Deutschland zeichnen sich in der ersten Hälfte des 21. Jahrhunderts primär Änderungen hin zu mehr Abfluss, also auch zu mehr Hochwasser, ab. Hochwasser sind in Deutschland die Naturkatastrophe, welche die größten wirtschaftlichen Schäden hervorruft (ebd.).

Diesen Trend kann man auch in Untersuchungen von Petrow und Merz (2009) sehen, welche 145 Abflusspegel, die in Deutschland verteilt liegen, untersucht haben. Die Untersuchungen ergaben für den Zeitraum von 1951 – 2002, dass der Pegel an 28% der Abflüsse gestiegen ist und nur an zwei Abflüssen fallende Trends beobachtet werden konnten. Jedoch unterscheiden sich die Ergebnisse regional: Während der Trend westlich und südwestlich steigt, gibt es in Ostdeutschland kaum signifikante Trends. Dies könnte an der Schnee- und Gletscherschmelze im Zuge des Klimawandels liegen. Allgemein zeigten die Mehrheit der Pegel keine signifikanten Trends auf (71 – 97%). Wenn es jedoch einen signifikanten Trend gab, waren diese durchweg positiv, was gleichbedeutend ist mit: Die Hochwasserscheitel bzw. -häufigkeiten nahmen zu. Dabei ist ebenfalls eine saisonale Differenz aufgefallen, in der die Wintermonate ausschließlich steigende, die Sommermonate hingegen sowohl steigende als auch fallende Trends zeigen.

An den untersuchten Pegeln der KLIWA Kooperationsländer und des Landes Hessen sind die mittleren Hochwasserabflüsse (MHQ) zwischen 1932 und 2015 an 70 % der Pegel angestiegen. Diese Trends sind allerdings in der Mehrheit nicht signifikant und sind zusätzlich in den letzten 15 Jahren schwächer ausgeprägt. (KLIWA, 2018a)

Im hydrologischen Winterhalbjahr wird für die Jahre 2021 – 2050 zum Vergleichszeitraum 1971 – 2000 an allen 16 untersuchten Pegeln eine größere Zunahme als Abnahme projiziert. Für sieben Pegel sind die verschiedenen Projektionen sogar ausschließlich positiv. (ebd.)

Für das hydrologische Sommerhalbjahr sind die Projektionen nicht so eindeutig. Auffällig ist jedoch, dass an den untersuchten nival geprägten Pegeln die Abnahmen größer als die Zunahmen sind. Während an den pluvial geprägten Pegeln gegenteiliges beobachtet werden kann. (ebd.)

Hochwasser können verschiedene Schadensbilder haben: Es gibt direkte materielle Schäden wie die Beschädigung von Gebäuden und Infrastruktur sowie direkte immaterielle Schäden wie Todesfälle oder Schäden an Ökosystemen. Zu den indirekten Schäden zählen Verkehrs- und Produktionsunterbrechungen, aber auch psychischer Stress. (Merz, 2013)

2.4.2 Niedrigwasser

Für den Begriff „Niedrigwasser“ gibt es aktuell keine umfassende Definition, sondern es handelt sich mehr um eine Charakterisierung unterschiedlicher Abflüsse. Nach Bosch & Partner (2019) kann Niedrigwasser ganz allgemein durch eine über mehrere Tage andauernde Abflusssituation unterhalb des jahreszeitlichen Mittelwerts beschrieben werden. (Bosch & Partner, 2019)

In Abbildung 9 sieht man Niedrigwasser in Bingen am Rhein. In den vergangenen Jahren gab es an mehreren kleinen und großen Flüssen in Deutschland länger andauernde Niedrigwasserperioden. Zuletzt 2011 und 2015. Die Wahrscheinlichkeit eines trockenen Sommers hat im Vergleich zu vor 1970 um mehr als das Doppelte zugenommen. (KLIWA, 2020)



Abbildung 9: Niedrigwasser in Bingen am Rhein (KLIWA, 2020)

Generell lässt sich vermuten, dass aufgrund der Klimafolgen pluvial geprägte Abflussregime Abnahmen der mittleren Abflussmengen in den Sommermonaten, mit längeren und intensiveren Niedrigwasserperioden, erfahren werden. In nival geprägten Abflussregimen wird eine Verschiebung der Abflussmaxima vom Sommer in das Frühjahr stattfinden sowie eine Verschiebung des Abflussminimums vom Winter in den Spätsommer. Niedrigwasserereignisse von nivalen Abflüssen werden vorrausichtlich in der ersten Hälfte des 21. Jahrhunderts weniger werden, aber in der zweiten Hälfte steigen. (Wolf-Schumann & Dumont, 2012)

An den untersuchten Pegeln der KLIWA Kooperationsländer und des Landes Hessen sind die jährlichen Niedrigstwasserabflüsse zwischen 1951 und 2015 an 60 % der Pegel leicht angestiegen. Ab 1974 ist eine Abnahme dieses Trends zu erkennen, was auf eine Trendumkehr hinweist. (KLIWA, 2018a)

Projizierte Änderungen zwischen 2021 – 2050 zu 1971 – 2000 zeigen an dem Großteil der 16 Pegel eine Abnahme von bis zu über 15 % für das hydrologische Sommerhalbjahr. Einzig für die Pegel Kleinheubach (Main) und Bad Vilbel (Nidda) sind ausschließlich Zunahmen projiziert. Für denselben Zeitraum projizierte Änderungen im hydrologischen Winterhalbjahr bilden die unterschiedlichen Modelle für die meisten Pegel sowohl Zu- als auch Abnahmen ab. Doch die projizierten Zunahmen sind größer als die Abnahmen. (KLIWA, 2018a)

Niedrigwasser kann viele negative Auswirkungen mit sich bringen. Eine der offensichtlichsten ist die Einschränkung der Wasserstraßen für die Schifffahrt und den Güterverkehr. Darüber hinaus sind auch die aquatischen Lebensräume bedroht, wenn es keinen ökologischen Mindestabfluss mehr gibt. Für die Speicherbewirtschaftung ist Niedrigwasser ein Balanceakt, zwischen Aufrechterhaltung des ökologischen Mindestabflusses und dem notwendigen Rückhalt. Zudem sollen gegebenenfalls noch die Interessen des Freizeit- und Erholungssektors an Speicherseen berücksichtigt werden. Die Wasserkraft ist direkt von Niedrigabflüssen betroffen, da bei geringerem Durchfluss weniger Strom generiert werden kann. Aber auch andere Energieversorger sind von Niedrigwasser betroffen, da der Kühlwasserbedarf eventuell nicht gedeckt werden kann oder darf, um keine zusätzlichen negativen ökologischen Folgen zu verursachen. Weitere Folgen können Trinkwasserknappheit, Ernteeinbußen durch fehlendes Bewässerungswasser und Nährstoffprobleme durch das Einleiten von gereinigtem Abwasser sein. (LfU, 2018)

2.4.3 Sturzfluten an Flüssen

Sturzfluten sind plötzliche Hochwasser, die meist durch kleinräumige, konvektive Starkregenereignisse ausgelöst werden. So können sie prinzipiell auch fernab von Gewässern auftreten und zu potenziellen Schäden führen. So beschränkt sich die Beurteilung der Schäden nicht allein auf das Gewässersystem, sondern das komplette Einzugsgebiet muss Beachtung finden. Im Folgenden wird näher auf die Sturzfluten an Flüssen eingegangen, um innerhalb der Thematik der Fließgewässer zu bleiben. (Gürke, et al., 2018)

Sturzfluten werden in Abgrenzung zum allgemeinen Hochwasser durch die Verzögerungszeit zwischen Niederschlag und Eintreten des Hochwasserscheitels definiert. Bei Sturzfluten beträgt die Reaktionszeit meist nicht mehr als 6 Stunden und sie treten besonders in gebirgigen oder urbanen Räumen in Einzugsgebieten kleiner gleich 500 km² auf. Die Aufnahmefähigkeit der Böden ist in solchen Gebieten nicht besonders hoch und viel Niederschlag wird zu Oberflächenabfluss. (Bronstert, et al., 2017)

Die besondere Gefährdung von Sturzfluten kommt durch die geringe Vorwarnzeit, hohe Fließgeschwindigkeiten und ihr chaotisches Verhalten. Die geringe Vorwarnzeit wird durch die schnelle Reaktion auf den Abfluss und die schwere Vorhersehbarkeit der auslösenden Starkregenereignisse begünstigt. Damit ist die rechtzeitige Einleitung von Gegenmaßnahmen eingeschränkt. (Bronstert, et al., 2017) Die Mortalitätsrate, Zahl der

Todesfälle geteilt durch die Zahl der Betroffenen, ist bei Sturzfluten deutlich höher als bei anderen Flusshochwassern (Jonkman, 2005). Hohe Fließgeschwindigkeiten, die bei Sturzfluten nicht nur im Gerinne sondern auch auf den Überflutungsflächen auftreten können, haben das Potenzial extreme Schäden an Gebäuden und der Infrastruktur zu verrichten. Dabei ist auch das mitgeführte Material ein großer Schadensverursacher. Man spricht von chaotischem Verhalten bei Sturzfluten, da das Ausuferungs- und Überschwemmungsverhalten so schwer vorhersehbar ist und oft durch singuläre Gegebenheiten beeinflusst wird. So können zum Beispiel Verschlüsse der Gerinne durch Treibgut an Brücken oder wasserbaulichen Anlagen zu spontanem Rückstau und einer Änderung des Fließweges führen. Ein plötzliches Lösen dieser Verstopfungen führt dann wiederum zu massiven Verstärkungen der Abflussspitzen. (Bronstert, et al., 2017)

In der Vergangenheit haben Untersuchungen gezeigt, dass sich die Anzahl der Starkniederschlagsereignisse häufen, was auch zu häufigeren Sturzfluten führen kann. Generell ist die Modellierung von Sturzfluten direkt sehr schwierig. (Gürke, et al., 2018)

2.5 Abflussänderungen an deutschen Flüssen

Als Beispiel der in 2.4 genannten Klimafolgen für die Abflüsse kann man drei der großen deutschen Flusseinzugsgebiete betrachten: Donau, Elbe und Rhein. Untersuchungen an verschiedenen Pegeln entlang der Flussläufe innerhalb Deutschlands werden im Folgenden erläutert. Um einen Kontext zu schaffen, werden erst Abflussregime und die zu erwartenden Änderungen aufgrund der Temperatur- und Niederschlagsentwicklung skizziert. Die Beispiele wurden sowohl wegen ihrer überregionalen Bedeutung, als auch aufgrund der guten Datenlage gewählt.

In Deutschland gibt es drei einfache Abflussregime: glazial, nival und pluvial (vgl. Abbildung 10). Pluviale Abflussregime werden vor allem durch Niederschlag gespeist und haben dadurch charakteristisch ihr Abflussmaxima in den niederschlagsreichen Wintermonaten und ihr Abflussminimum in den weniger niederschlagsintensiven Sommermonaten. Die Abflusskurven nivaler Abflussregime haben im Frühjahr ihr Maximum, da sie durch Schmelzwasser geprägt werden. Glaziale Abflussregime sind durch das sommerliche Abschmelzen von Gletschern geprägt und treten in Deutschland nur im Alpenraum auf. Ihre Abflussminima sind in den Wintermonaten und ihr Maximum im Sommer. (Wolf-Schumann & Dumont, 2012)

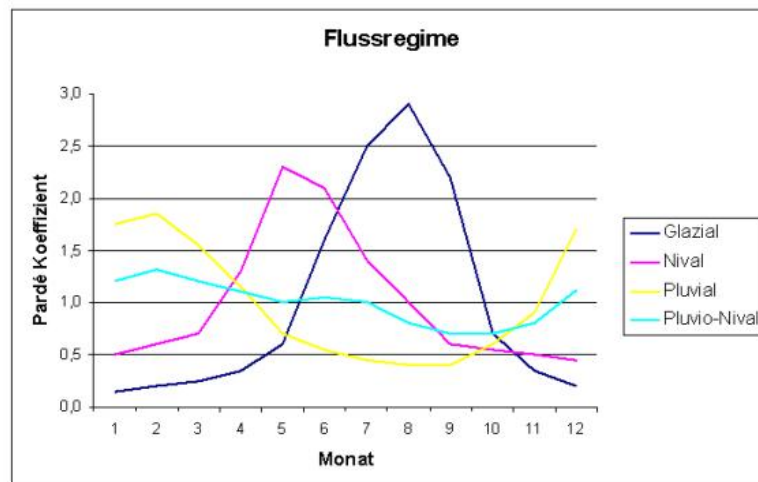


Abbildung 10: Hydrologische Flussregime in Deutschland (Wolf-Schumann & Dumont, 2012)

Als Folge der Niederschlags- und Temperaturänderungen verschieben sich auch die Abflussregime. Pluviale Abflussregime werden in der ganzjährigen Betrachtung einen höheren mittleren Abfluss bekommen. Dies gilt allerdings nicht für das komplette Jahr. Im Sommer werden durch Niederschlagsabnahme und erhöhte Evapotranspiration die Dauer und Intensität von Niedrigwasser zunehmen. Im Winter wiederum wird es eine Erhöhung der Abflüsse geben, da die Wintermonate niederschlagintensiver ausfallen werden. Nivale Abflussregime werden schon in naher Zukunft eine Abnahme der Abflussmengen haben und das Abflussmaxima wird sich aus den frühen Sommermonaten mehr in das Frühjahr schieben, während das Minimum in den Spätsommer rückt. Die Niedrigwasserereignisse nival geprägter Flüsse nehmen wahrscheinlich in der ersten Hälfte des 21. Jahrhunderts ab, was die Wasserkraft begünstigt: Zum Beispiel an den oberen Einzugsgebieten von Rhein und Donau. Glaziale Abflussregime werden für Temperaturerhöhungen von 2-3 °C einen höheren Abfluss haben. Dieser Effekt ist aber limitiert, da er von der Gletscherschmelze begünstigt wird. Wenn die Gletscher abgeschmolzen sind und sich aufgrund der konstant höheren Temperatur nicht mehr neu bilden können, werden Flüsse mit ausschließlich glazialen Abflussregime versiegen. (Wolf-Schumann & Dumont, 2012)

2.5.1 Rhein

Der Rhein hat ein komplexes Abflussregime. Im Oberlauf bis circa Karlsruhe hat er ein nival und unterhalb ein nival-pluvial geprägtes Regime. Untersuchungen des Abflussgeschehens zeigen, dass sich bereits in der Vergangenheit die Abflussmaxima der unterschiedlichen Abflussregime angeglichen haben. (Bronstert, et al., 2017)

Analysen der Rheineinzugsgebiete (vgl. im Anhang unter Abbildung 15) haben ergeben, dass die mittleren Gebietsniederschläge am Rhein für den meteorologischen Winter (Dezember – Februar) im Vergleich 1901 – 1930 zu 1971 – 2000 einen zunehmenden Trend

haben. Im meteorologischen Sommer (Juni – August) zeichnen sich keine Trends ab. Vergleiche dafür Tabelle 2. (IKSR, 2011)

Weiter wurde auch der Mittelwasserabfluss/hydrologisches Halbjahr (MQ) und der höchste mittlere Tagesabfluss (MHQ) untersucht. Für MQ im Sommer zeigen die Hälfte der betrachteten Rheinpegel (Kaub, Köln und Lobith) keinen Trend auf. Die andere Hälfte (Basel, Maxau und Worms) hat abnehmende Trends zwischen 6% und 7,2%. Dies ist auf die Wirkung von höheren Temperaturen zurückzuführen (höhere Verdunstung) in Kombination mit dem stagnierenden Niederschlag (zu erkennen in der Tabelle an SumhN: Summe des Niederschlags über einem Einzugsgebiets pro meteorologischer Jahreszeit) und geringerem Schneevolumen in den Alpen. Auffälliger ist MQ im Winter: alle Pegel zeigen Abflusszunahmen von 7,2% bis 14,1%. (ebd.)

Ähnlich verhält es sich auch bei MHQ. Alle Pegel, bis auf Lobith, zeigen positive Trends von bis zu 13,1%. Dies ist bei genauerer Betrachtung der Daten aber nicht auf eine Erhöhung der extremen Scheitelabflüsse zurückzuführen, sondern auf häufigeres Auftreten mittlerer und großer Hochwasser. (ebd.)

Tabelle 2: Prozentuale Änderungen zwischen den Perioden 1901-1930 und 1971-2000 von SumhN, MQ und MHQ am Rhein (In Anlehnung an IKSR, 2011).

Kennwert	Pegel	1901-1930	1971-2000	Änderung in %
SumhN [mm] meteorologischer Sommer (JJA)	EZG bis Basel	378	379	+5,1
	EZG bis Maxau	406	396	-2,4
	EZG Neckar (Rockenau)	262	259	-1,2
	EZG Main (Würzburg)	227	227	+0,2
	EZG Mosel (Cochem)	231	216	-6,5
	EZG bis Lobith	287	278	-3,1
SumhN [mm] meteorologischer Winter (DJF)	EZG bis Basel	301	321	+6,8
	EZG bis Maxau	248	280	+13,1
	EZG Neckar (Rockenau)	176	211	+19,9
	EZG Main (Würzburg)	161	185	+16,2
	EZG Mosel (Cochem)	224	249	+11,2
	EZG bis Lobith	210	236	+12,7
MQ [m³/s] hydrologisches Sommerhalbjahr (Mai-Okt)	Basel	1312	1218	-7,2
	Maxau	1460	1349	-7,6
	Worms	1559	1466	-6,0
	Kaub	1678	1642	-2,1
	Köln	1900	1887	-0,7
	Lobith	2009	1963	-2,3
MQ [m³/s] hydrolo- gisches Winter- halbjahr (Nov- Apr)	Basel	797	910	+14,1
	Maxau	1036	1170	+12,9
	Worms	1225	1386	+13,1
	Kaub	1531	1738	+13,5
	Köln	2149	2410	+11,7
	Lobith	2406	2580	+7,2
	Basel	2492	2734	+9,7
	Maxau	2861	3168	+10,7
	Worms	3155	3568	+13,1

MHQ [m³/s] hydrolo- gisches Jahr (Nov-Okt)	Kaub	3916	4344	+10,9
	Köln	5924	6538	+10,4
	Lobith	6454	6642	+2,9
<p><u>Orange:</u> abnehmende Tendenz = Werte $\leq -5\%$</p> <p><u>Grau:</u> keine Tendenz = Werte zwischen $-4,9\%$ bis $+4,9\%$</p> <p><u>Blau:</u> zunehmende Tendenz = $\geq +5\%$</p>				

Solche Trendverschiebungen sind deutlich abhängig von der Klimaänderung, da unter anderem die erhöhten Temperaturen in den Frühlingsmonaten ein früheres Abschmelzen des Schnees begünstigen. Für die Zukunft ist ein weiteres Angleichen der Abflussspitzen anzunehmen. Dies birgt eine größere Wahrscheinlichkeit für Extremhochwasser, was zu einem erhöhten Hochwasserrisiko führt. (Bronstert, et al., 2017)

In Tabelle 3 sind projizierte Änderungen für die Mitte und das Ende des 21. Jahrhunderts im Vergleich zu 1961 – 1990 dargestellt. Zusätzlich zu den in Tabelle 2 gezeigten Änderungen wird noch die wahrscheinliche Änderung für Hochwasserabflüsse aufgezeigt. Die Gebietsniederschläge im Sommer und Winter werden sich bis Mitte des 21. Jahrhunderts ähnlich dem vergangenen Jahrhundert verhalten. Ein klarer Trend im Sommer spiegelt sich nicht wider und die Zunahmen im Winter fallen moderat aus. Daraus folgt, dass das Abflussverhalten Mitte des 21. Jahrhunderts sich ähnlich dem des letzten Jahrhunderts verhalten wird. (IKSR, 2011)

Ende des 21. Jahrhunderts nimmt der Niederschlag in den Sommermonaten bis zu 30% ab, das spiegelt sich auch in den Abnahmen der sommerlichen Mittel- und Niedrigabflüssen in ähnlichen Größen wider. Gegenläufiges gilt für den Winter. (ebd.)

Die Hochwasserkennwerte an den Pegeln Unterstrom Kaub weisen für beide Zukunftsbeurachtungen eine Zunahme auf. Für die Pegel Basel, Maxau und Worms werden wegen Unsicherheiten keine Aussagen getroffen. (ebd.)

Aus Anerkennung der Schwierigkeiten von Hochwasserprognosen aufgrund vieler nicht zu berücksichtigender Einflussgrößen, wird in Tabelle 3 von „häufigen“ „mittleren“ und „extremen“ Hochwasser gesprochen und nicht der Fachterminus HQ_T verwendet. (ebd.)

Tabelle 3: Prozentuale Änderung SumhN, MQ, MHQ und Hochwasser (10, 100 und 1000 Jahre) zwischen 1961-1990 und 2021-2050 bzw. 2071-2100 (in Anlehnung an IKS, 2011).

Kennwerte	Pegel	Szenarienkorridore	
		Änderung % Nahe Zukunft	Änderung % Ferne Zukunft
Teil 1			
SumhN meteorologi- scher Sommer (JJA)	EZG bis Basel	-10% bis +5%	-30% bis -10%
	TEZG Oberrhein-Süd	-10% bis +5%	-30% bis -15%
	TEZG Mittel- / Oberrhein-Nord	-10% bis +10%	-30% bis -10%
	TEZG Niederrhein	-10% bis +10%	-30% bis -10%
	EZG Neckar	-10% bis +10%	-30% bis -10%
	EZG Main	-10% bis +10%	-30% bis -5%
	EZG Mosel	-15% bis +5%	-30% bis -15%
	EZG bis Lobith	-10% bis +5%	-25% bis -10%
SumhN meteorologi- scher Winter (DJF)	EZG bis Basel	0% bis +10%	0% bis +20%
	TEZG Oberrhein-Süd	0% bis +15%	+5% bis +25%
	TEZG Mittel- / Oberrhein-Nord	0% bis +10%	+10% bis +20%
	TEZG Niederrhein	0% bis +15%	+5% bis +20%
	EZG Neckar	0% bis +10%	+5% bis +20%
	EZG Main	0% bis +15%	+10% bis +20%
	EZG Mosel	0% bis +10%	+5% bis +20%
	EZG bis Lobith	0% bis +15%	+5% bis +20%
MQ hydrologisches Sommerhalb- jahr (Mai-Okt)	Basel	-10% bis +5%	-25% bis +10%
	Maxau	-10% bis +5%	-25% bis +10%
	Worms	-10% bis +5%	-25% bis +10%
	Kaub	-10% bis +10%	-25% bis +10%
	Köln	-10% bis +10%	-25% bis +10%
	Lobith	-10% bis +10%	-25% bis +10%
MQ hydrologisches Winterhalbjahr (Nov-Apr)	Basel	0% bis +20%	+5% bis +25%
	Maxau	0% bis +20%	+5% bis +25%
	Worms	0% bis +20%	+5% bis +25%
	Kaub	0% bis +20%	+5% bis +25%
	Köln	0% bis +15%	+5% bis +25%
	Lobith	0% bis +15%	+5% bis +25%
Teil 2			
MHQ hydrologisches Jahr (Nov-Okt)	Basel	-5% bis +10%	-25% bis +15%
	Maxau	-5% bis +15%	-20% bis +15%
	Worms	-10% bis +20%	-15% bis +15%
	Kaub	-5% bis +25%	-10% bis +20%
	Köln	-0% bis +20%	-5% bis +20%
	Lobith	-0% bis +20%	-5% bis +20%
Abfluss bei „häufigem“ Hochwasser (entspricht HQ10)	Basel	-10% bis +10%	-20% bis +20%
	Maxau	-15% bis +20%	-15% bis +25%
	Worms	-15% bis +15%	-10% bis +35%
	Kaub	-15% bis +15%	-5% bis +40%
	Köln	-5% bis +15%	0% bis +40%
	Lobith	-5% bis +15%	0% bis +40%
Abfluss bei „mittlerem“	Basel	-20% bis +10%	-30% bis +25%
	Maxau	-10% bis +15%	-25% bis +30%

Hochwasser (entspricht HQ100)	Worms	-5% bis +20%	-25% bis +35%
	Kaub	-5% bis +20%	-10% bis +25%
	Köln	0% bis +20%	0% bis +25%
	Lobith	0% bis +20%	0% bis +25%
Abfluss bei „extremem“ Hochwasser (entspricht HQ1000)	Basel	-20% bis +35%	-10% bis +50%
	Maxau	-20% bis +35%	-20% bis +65%
	Worms	-15% bis +30%	-20% bis +45%
	Kaub	-5% bis +25%	-10% bis +30%
	Köln	-5% bis +25%	0% bis +30%
	Lobith	-5% bis +20%	-5% bis +30%
<p>Orange: abnehmende Tendenz = Teil 1 – überwiegende Mehrzahl (80%) der Projektionen zeigt eine abnehmende Tendenz; Teil 2 – der Mittelwert der Projektionen zeigen eine Tendenz < -5%</p> <p>Grau: keine Tendenz = Teil 1 – etwa gleich viele der Projektionen zeigen eine Zu- bzw. Abnahme; Teil 2 – der Mittelwert der Projektionen zeigt eine Tendenzen zwischen -5% und +5%</p> <p>Blau: zunehmende Tendenz = Teil 1 – überwiegende Mehrzahl (80%) der Projektionen zeigt eine zunehmende Tendenz; Teil 2 – der Mittelwert der Projektionen zeigen eine Tendenz > +5%</p> <p>Weiß: keine Aussage möglich; Wertespanne größer 50% oder methodische Defizite</p>			

Die Entwicklungen bis 2050 gehen mit überwiegend moderaten Änderungen einher. So bleibt MQ im Sommer annähernd unverändert zur Referenzperiode. MQ im Winter steigt um etwa +10%. Für die Änderungen bis 2100 zeigen sich vergleichbare Größenordnungen im sich ändernden Niederschlagsverhalten wie auch dem mittleren Abfluss. In den Sommermonaten mit Abnahmen von bis zu -25% und in den Wintermonaten mit Zunahmen bis zu +25%. Bezüglich der Hochwasserkennwerte weisen viele Projektionen auf eine Zunahme hin. (IKSR, 2011)

Andere Modellrechnungen zeigen, dass die Abflüsse im Rhein bis 2100 um 10 – 25% sinken könnten. Die Verschiebung der Abflussmaxima in die Wintermonate zeichnet sich dort noch klarer ab. (Kunstmann, et al., 2017)

2.5.2 Elbe

Der Elbpegel in Dresden zeigt in den vergangenen 150 Jahren einen abnehmenden Trend. Dies könnte durch die Verringerung von winterlichem Hochwasser kommen. Solche Verringerungen können durch Klimaänderungen auftreten. Durch höhere Temperaturen im Winter nimmt die Eisbedeckung ab und damit ebenfalls die daraus resultierenden Eisstauereignisse. Auch wenn dabei zu beachten ist, dass die Begradigung der Elbe ebenfalls dazu beigetragen hat. Zudem sinkt die Bedeutung von Schneeschmelzen für die Hochwasserentstehung im Elbgebiet. (Bronstert, et al., 2017)

In Abbildung 11 werden die projizierten Änderungen von Temperatur, Niederschlag und Abfluss im Elbeinzugsgebiet graphisch dargestellt. Das obere Modell STARS ist ein regionales statisches Klimamodell. Das Emissionsszenario auf welches sich bei den Rechnungen bezogen wird, ist eine zukünftige Welt mit raschem Wirtschaftswachstum, ab Mitte

des Jahrhunderts abnehmender Weltbevölkerung, der ausgewogenen Nutzung von fossilen und erneuerbaren Energiequellen und der raschen Einführung neuer und effizienter Technologien. Es verwendet Daten von 853 Klimastationen. Das ISI-MIP Modell ist ein internationales Projekt aus unterschiedlichen Sektoren und mit einem öffentlichen Datenarchiv. Im Vergleich zu STARS hat es eine gröbere räumliche Auflösung. Im Rahmen dieser Thesis wird nicht näher auf verschiedene Modelle und deren Funktionsweise eingegangen. (Roers & Wechsung, 2015)

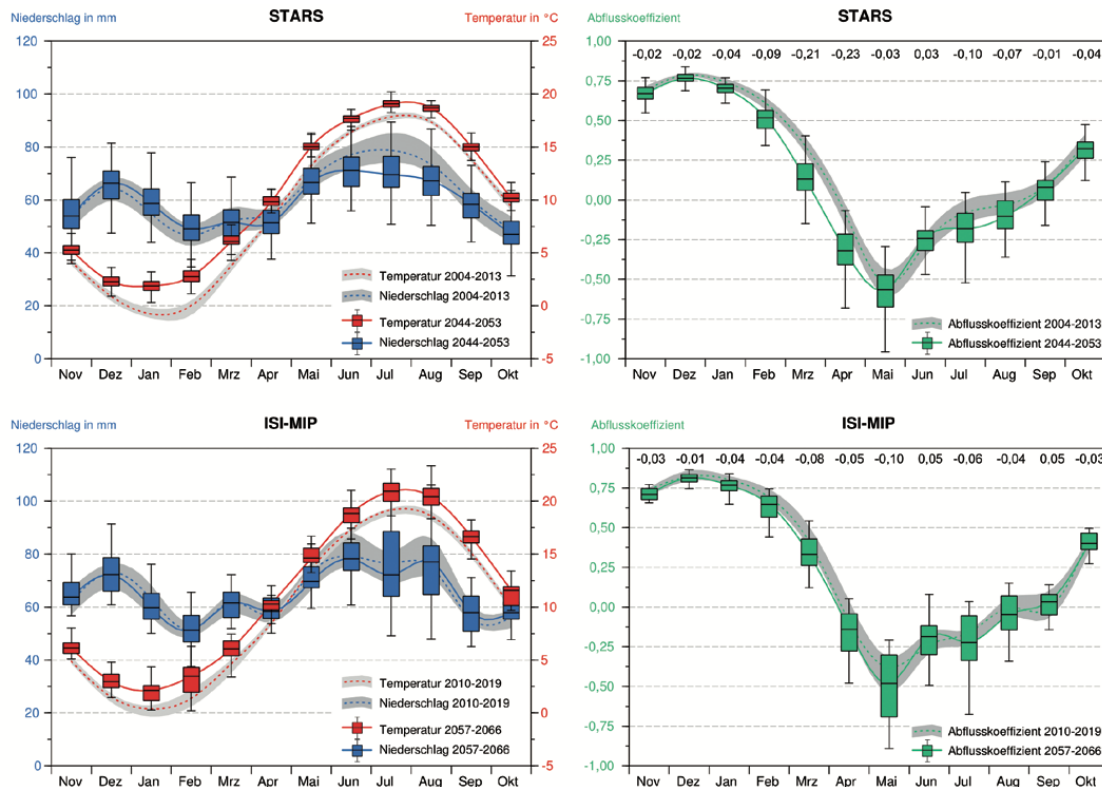


Abbildung 11: Projektzierte Änderung der mittleren monatlichen Temperatur und des Niederschlags (links) sowie des Abflusskoeffizienten (rechts). Modelle: STARS (oben) und ISI-MIP (unten) (Roers & Wechsung, 2015)

In beiden Modellen weisen die Temperaturen im Elbeinzugsgebiet (vgl. im Anhang unter Abbildung 16) im Vergleich zur Referenzperiode einen ganzjährigen Anstieg auf. Dies passt zu den voraussichtlichen Änderungen für ganz Deutschland. Für den Niederschlag in der STARS-Projektion weisen die Sommermonate deutliche Abnahmen auf. Am stärksten ist die Abnahme im Juli mit -9 mm. Im meteorologischen Winter werden leichte Zunahmen stattfinden. Allerdings sind diese mit maximal 4 mm von geringerer Änderung als die Abnahmen im Sommer. (Roers & Wechsung, 2015)

Anders ist es bei ISI-MIP, dort werden keine klaren Änderungen im Niederschlag gezeigt. Die größte Abnahme hat der Juli mit -4 mm und die größte Zunahme der September mit +3 mm. Geringe Zunahmen finden sich sowohl im Sommer- als auch im Winterhalbjahr.

Diese Änderungen im Niederschlag sind in einer räumlichen Betrachtung noch ausgeprägter:

- Für das STARS-Szenario ist im Gesamtjahr der Rückgang der Niederschlagsmenge der Mittelgebirge (Erzgebirge, Riesengebirge, Böhmerwald) mit fast -40 mm am stärksten. Im Flachland nördlich und südlich ist der Rückgang mit -5 mm bis -20 mm geringer.
 - Im Sommerhalbjahr sind die Rückgänge ähnlich verteilt wie im Gesamtjahr, nur dass im unteren Einzugsgebiet Rückgänge bis -28 mm projiziert werden.
 - Für das Winterhalbjahr werden für das untere Einzugsgebiet mit +13 mm deutliche Zunahmen des Niederschlags projiziert. Für das mittlere und obere Einzugsgebiet +4 mm bzw. +2 mm.
- Das ISI-MIP-Ensemble projiziert geringe Änderungen des Gebietsmittels der Niederschläge. Es ist ein deutlicher Nord-Süd-Gradient erkennbar. Das untere bzw. nördliche Einzugsgebiet weist sowohl im Jahresmittel als auch im hydrologischen Winterhalbjahr eine mittlere Niederschlagszunahme von +10 mm auf. Für das Gesamtjahr weist das obere bzw. südliche Einzugsgebiet eine Abnahme von -7 mm Niederschlag auf.

(Roers & Wechsung, 2015)

Für den Abfluss zeigen beide Modellrechnungen größtenteils Abnahmen des Abflusskoeffizienten, der das Verhältnis des Niederschlags (potenzieller Abfluss) zum tatsächlichen Abfluss darstellt. STARS projiziert die größten Abnahmen im März und April (-0,21 bzw. -0,23). Einzig für den Juni wird eine geringe Zunahme projiziert (+0,03). Die Variabilität zwischen den Projektionen ist deutlich kleiner beim ISI-MIP-Ensemble. Dort ist die größte Änderung -0,1 im Mai und die kleinste -0,01 im Dezember. (ebd.)

Über die räumliche Verteilung der Abflüsse sind für STARS und ISI-MIP ähnliche Aussagen zu treffen. In beiden nimmt die Änderung der mittleren Gesamtabflüsse vom oberen Einzugsgebiet bis zum unteren Einzugsgebiet hin ab. Ähnlich verhält es sich auch bei der Halbjahresbetrachtung. Bei beiden sind für den Sommer kaum Änderung projiziert, während für den Winter fast flächendeckend eine Abnahme des Abflusses projiziert wird. (ebd.)

2.5.3 Donau

Im Folgenden werden die Klimafolgen für die Donau bis zum Pegel Achleiten (Oberösterreich) an der deutsch-österreichischen Grenze aufgezeigt (vgl. im Anhang unter Abbildung 17). Messungen des Pegels Achleiten zeigen, dass sich das Abflussregime in den vergangenen 100 Jahren langsam verschoben hat. Die Abflüsse während der Sommermonate sinken und steigen während der Wintermonate (vgl. Abbildung 12). Diese Effekte

können sowohl durch den Klimawandel hervorgerufen werden, als auch durch den stärkeren anthropogenen Einfluss durch Talsperren und Speicher. Der jeweilige Anteil an der Änderung kann nur schwer quantifiziert werden. (Klein, et al., 2011)

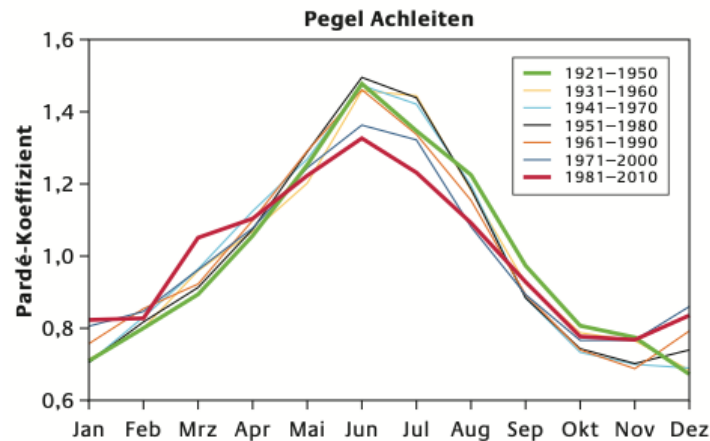


Abbildung 12: Abflussregime am Pegel Achleiten für verschiedene Zeitspannen (Klein, et al., 2011)

In Abbildung 13 sieht man die Projektionen von langjährigen Mitteln am Pegel Achleiten im Vergleich zwischen naher und ferner Zukunft (2021-2050/2071-2100) zur Referenzperiode 1961 – 1990.

Für die nahe Zukunft zeigen sich moderate Abnahmen, wohingegen die Abnahmen Ende des 21. Jahrhunderts größer ausfallen. Die Wanderung der Abflussspitze zum Jahresanfang ist ein Indiz für eine Änderung hin zu einem vom Regen bestimmten Abflussregime. Ursachen sind Änderungen in den Schneeprozessen durch höhere Temperaturen und eine Änderung des Niederschlags zu erhöhten Winterniederschlägen. (Klein, et al., 2011)

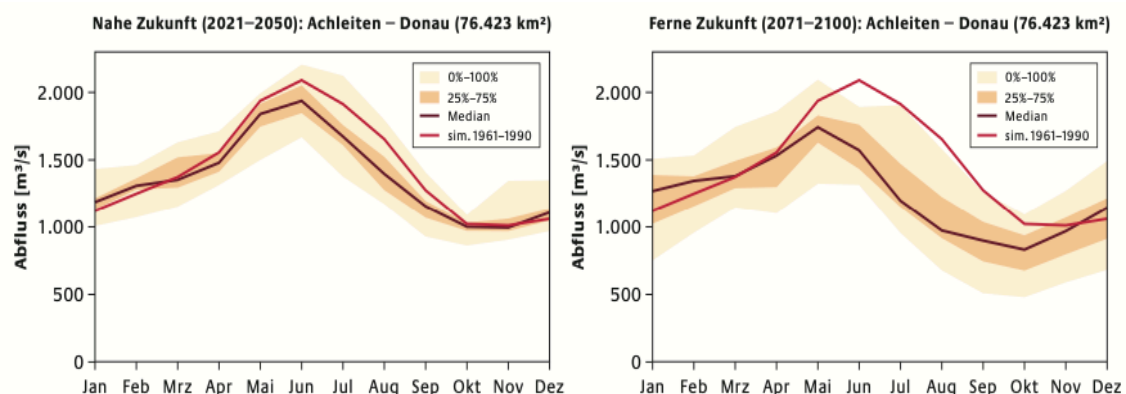


Abbildung 13: Simulierte Abflussmittel in naher Zukunft (2021-2050) und ferner Zukunft (2071-2100) im Vergleich zu 1961-1990 am Pegel Achleiten (Klein, et al., 2011)

Änderungen wie an den oben genannten Beispielen werden sich auch an kleineren Flüssen feststellen lassen, denn es ist davon auszugehen, dass am Ende des 21. Jahrhunderts glaziale Abflüsse verschwunden sein werden und Flüsse, die vorher nival geprägt waren,

einen nivo-pluvialen Charakter bekommen werden. (Wolf-Schumann & Dumont, 2012)
Die Abnahmen des Schneewassers könnten schon bis Mitte des Jahrhunderts im Alpenen Raum 40-80% betragen (Kunstmann, et al., 2017).

2.6 Wasserwirtschaftliche Handlungsoptionen

Traditionell gibt es in Deutschland schon lange Hochwasserschutz und Hochwasservorsorge. Diese Erfahrungen helfen, um die Entwicklungen des Klimawandels mit einzubinden und anknüpfen zu lassen. (UBA, 2011)

Raumplanerisch ist es wichtig in Hochwasserrisikogebieten eine nicht angepasste Nutzung und Bebauung zu vermeiden und die Siedlung in solchen Gebieten einzuschränken. Überschwemmungsflächen (Retentionsflächen) sind bereitzustellen und auszuweisen. Gerade im innerstädtischen Bereich sind technische Maßnahmen von Bedeutung. Dort fehlt oft der Platz um Retentionsflächen zu schaffen. Technische Maßnahmen sind z.B. Verstärkung und Neubau von Hochwasserschutzanlagen, die Erhöhung der Durchlässigkeit für hohe Abflussspitzen, Überflutungspolder, mobile Schutzwälle sowie eine hochwassersichere Bauweise. Eine zu priorisierende Bauweise sind resiliente Schutzsysteme, wie in Abbildung 14 zu sehen. Durch diese können bei Extremereignissen größerer Schäden in Folge einer Überlastung von Deichen weiter begrenzt werden. (StMUV, 2014) (UBA, 2011) (Hattermann, et al., 2011)

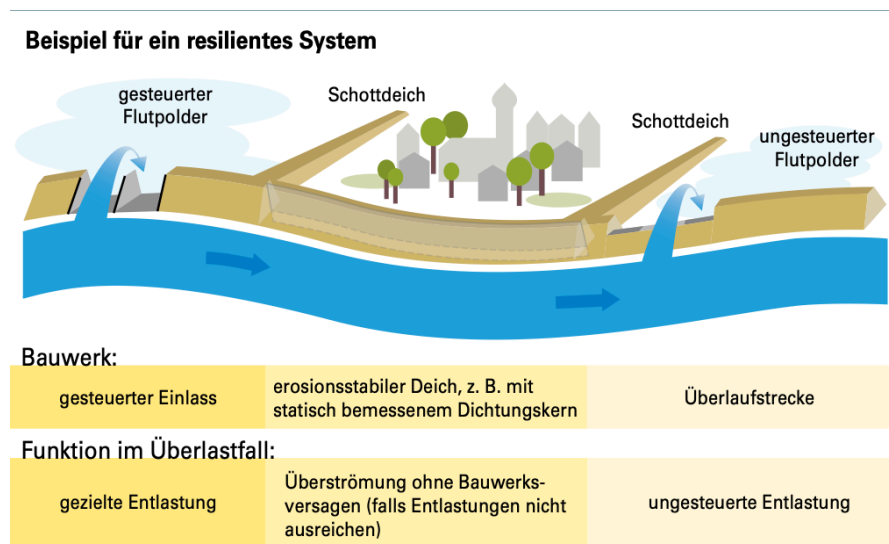


Abbildung 14: Resiliente Schutzsysteme für den Hochwasserfall (StMUV, 2014)

Eine weitere, den Folgen des Klimawandels angepasste, Handlungsoption ist es, Speicherräume die Wasser bei Hochwasser speichern und bei Niedrigwasser nach Bedarf ableiten können zu erhöhen und Entwässerungssysteme zu erneuern.

Hochwasserschutz kann auch mit ökologischen Vorteilen verknüpft werden. Deichrückverlegung, das Wiederansiedeln von Auenwäldern, Wasserrückhalt in der Fläche durch Rücknahme von Entwässerungsmaßnahmen und eine Verbesserung der Regenwasserversickerung vor Ort schützen nicht nur vor Hochwasser, sondern tun auch der Natur gut. Zudem sollte auch eine Verbesserung des Versicherungsschutzes gegen Hochwasserschäden erfolgen. (Hattermann, et al., 2011) (UBA, 2011)

In Bezug auf Niedrigwasser gibt es verschiedene Ansätze und Handlungsoptionen. Handlungsoptionen mit ganzheitlichen, übergeordneten Ausrichtungen sind folgend aufgelistet:

- Notfallpläne zum Management im akuten Niedrigwasserfall, um dessen Auswirkungen zu mindern, sollten erstellt werden.
- Regionale Evaluierung von Niedrigwasserkennwerten zur Verbesserung der Datengrundlage und zur Entscheidungsfindung über neue oder zu modernisierende Standorte für Wasserkraftanlagen, sollten vorangetrieben werden.
- Verbesserung der Niedrigwasservorhersage, welche mehr Planungssicherheit für die Nutzung von Fließgewässern liefern kann.
- Bessere Koordinierung bzw. Organisation der Überwachung von Wassernutzung und Altrechten, um vor allem die Übernutzung, in diesem Fall primär die Wasserentnahmen und Begradigungen kleinerer Fließgewässer, zu vermeiden.

(KLIWA, 2018b)

Eine Handlungsoption mit innovativem und herausforderndem Aspekt wäre ein Leitfaden für bauliche Gewässermaßnahmen. So könnten verschiedene Wassernutzer wie die Landwirtschaft, Wasserkraftwerksbetreiber, Industrie und die Touristikbranche zusammengeführt werden. (ebd.)

Unter einem technisch-planerischem Fokus können ein anpassungsfähiges Management und eine dynamische Wassernutzung helfen, um angepasste Stau- und Aufhöhungsziele zu verfolgen. Auch die Erstellung von Niedrigwasserrinnen könnte einen gewissen Wasserstand, sowie die Durchlässigkeit von Gewässern garantieren. Ähnlich wie die Niedrigwasseraufhöhung, bei der gezielt Speicherabgaben stattfinden. (ebd.)

Anpassungen an die Folgen des Klimawandels können nicht nur für die Fließgewässer an sich getroffen werden, sondern auch an den Wasserkraftanlagen, um mit geänderten Abflussregimen besser umgehen zu können. Die Erhöhung der Potenzialnutzung durch einen Ausbaugrad von 1,4 oder 1,5 ist realisierbar. Damit wäre eine Anpassung an ein verändertes Abflussregime optimal genutzt, solange auch im Teillastbereich mit hohen Wirkungsgraden gearbeitet wird. Der Ausbaugrad berechnet sich bei Laufwasserkraftwerken mit dem Ausbaudurchfluss geteilt durch den mittleren Abfluss. Ein hoher Wirkungsgrad kann durch Modernisierung von Turbine, Generator und ggf. Getriebe erreicht werden. Dabei ist darauf zu achten, dass die Wirkungsgradkurve so liegt, dass die Anlage auch im

Teillastbetrieb noch gute Wirkungsgrade erreicht. Dies kann über die Wahl der Turbine entschieden werden. (Wolf-Schumann & Dumont, 2012)

Eine Erhöhung der Fallhöhe kann ebenfalls dazu beitragen, verminderte Abflüsse auszugleichen, ist aber oft topographisch, baulich oder technisch nicht umsetzbar.

Zusätzlich kann der Einsatz automatischer Steuerung und Rechenreinigungsmaschinen zur Steigerung des Wirkungsgrades beitragen. Genauso wie das Automatisieren von Wehren, Einlauf- und Spülschützen um händische Arbeit und damit Stillstand zu vermeiden. Wichtig zu beachten bei Betrieb, Neubau und Sanierung von Wasserkraftanlagen ist zudem die Anpassung an die steigende Hochwassergefahr. Bei einigen Anlagen könnten die Kosten der Sicherheitsanpassung jedoch die Grenzen der Wirtschaftlichkeit überschreiten. (edb.)

3. Anpassungsstrategien

„In der Bundesrepublik Deutschland liegen für Gewässer Zuständigkeiten von der Bundes- über die Landesebene bis hin zu den Kommunen vor. Daher kommt der vertikalen Integration – oder multilevel governance, also dem Zusammenspiel der zuständigen Ebenen – eine besondere Bedeutung zu.“ (Kunstmann, et al., 2017)

3.1 Rechtliche Rahmenbedingungen

Im Folgenden soll ein Einblick über die Normenhierarchie im Cluster Wasser gegeben werden, um die rechtliche Komplexität der Klimaanpassungen zu verdeutlichen.

Wasserrahmenrichtlinie

Die Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik, kurz Wasserrahmenrichtlinie (WRRL), hat unter anderem als Ziel den Schutz von Binnen- und Übergangsgewässern (Art. 1 WRRL).

Zu diesen Zielen zählen die Minderung der Auswirkung von Überschwemmungen und Dürren (Art. 1 WRRL) und die Verhinderung der Verschlechterung des Zustands der Oberflächengewässer (Art. 4 Abs. 1 WRRL).

HWRM-RL

Das Europäische Parlament und der Rat haben 2007 eine Richtlinie 2007/60/EG über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken (HWRM-RL) erlassen. Diese verpflichtet die Mitgliedsstaaten zur Bewertung des Hochwasserrisikos, zur Erstellung von Hochwassergefahrenkarten, Hochwasserrisikokarten und zu Hochwasserrisikomanagementplänen.

Hochwassergefahrenkarten erfassen Gebiete die mit niedriger Wahrscheinlichkeit oder durch Extremereignisse, mit mittlerer Wahrscheinlichkeit (HQ_{100} - seltener) und mit hoher Wahrscheinlichkeit überflutet werden (Art. 6 Abs. 3 HWRM-RL). Für diese Gebiete sind jeweils das Ausmaß der Überflutung, die Wassertiefe/der Wasserstand und die Fließgeschwindigkeit bzw. der relevante Wasserabfluss anzugeben (Art. 6 Abs. 4 HWRM-RL). Zudem ist die Anzahl der potenziell betroffenen Einwohner und die Art der Wirtschaft in einem betroffenen Gebiet anzugeben (Art. 6 Abs. 5 HWRM-RL).

Hochwasserrisikomanagementpläne haben als Ziel, die hochwasserbedingten negativen Folgen für die menschliche Gesundheit, die Umwelt, das Kulturerbe und die wirtschaftliche Tätigkeit zu verringern (Art. 7 Abs. 2 HWRM-RL). Sie berücksichtigen relevante Aspekte, wie etwa Kosten und Nutzen, die Ausdehnung der Überschwemmung, Hochwasserabflusswege, mögliche Retentionsgebiete, Bodennutzung, Wasserwirtschaft, Raumordnung, Flächennutzung, Naturschutz, Schifffahrt und Hafeninfrastruktur (Art. 7 Abs. 3 HWRM-RL). Der Schwerpunkt der Pläne liegt auf der Vermeidung, dem Schutz und der

Vorsorge (Einschließlich Hochwasservorhersagen und Frühwarnsysteme) (Art. 7 Abs. 3 HWRM-RL).

Wasserhaushaltsgesetz

Diese EU-Richtlinien wurde in Deutschland mit Novellierung des Gesetzes zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz), im Folgenden kurz WHG genannt, in das nationales Recht Deutschlands übernommen.

Das WHG regelt für Deutschland die Grundsätze der Bewirtschaftung, des Gebrauchs und des Schutzes von oberirdischen Gewässern, der Küsten- und Meeresgewässer sowie des Grundwassers.

Für die oberirdischen Gewässer werden beispielsweise die Grundanforderungen an die Mindestwasserführung bei baulicher Aufstauung oder Entnahme (§33 WHG), die Durchgängigkeit bei Errichtung und Betrieb von Stauanlagen (§34 Abs. 1 WHG) sowie die Verpflichtung zur Umsetzung von Maßnahmen zum Schutz der Fischpopulation bei geplanter oder vorhandener Wasserkraftnutzung (§35 Abs. 1-2 WHG), bis hin zur Pflege und Unterhaltung der Gewässer, formuliert.

In Abschnitt 6 des WHG wird der Hochwasserschutz behandelt und die diesbezüglichen Anforderungen der HWRM-RL umgesetzt. Insbesondere:

- Die Notwendigkeit der Bewertung von Hochwasserrisiken und die Ausweisung von Risikogebieten
- Die Erstellung von Risiko- und Gefahrenkarten für Hochwasserereignisse, abgestuft nach niedriger Wahrscheinlichkeit (≥ 200 Jahre), mittlerer Wahrscheinlichkeit (≥ 100 Jahre) oder hoher Wahrscheinlichkeit
- Die Erstellung von Risikomanagementplänen
- Die Festlegung von Überschwemmungsgebieten
- Die wesentliche Untersagung der Ausweisung von Bebauungsgebieten im Rahmen von kommunalen Bauleitplanungen nach dem Baugesetzbuch (BauBG), wobei Ausnahmen möglich sind

(WHG, 2009)

Darüber hinaus werden Hochwasserentstehungsgebiete definiert und die Länder ermächtigt, Kriterien für Hochwasserentstehungsgebiete infolge Starkniederschlägen oder Schneeschmelzen im Bereich oberirdischer Gewässer regional festzulegen (§78d WHG). Eine Verpflichtung besteht jedoch nicht.

Die vorgenannte Risikobewertung und die Bestimmung von Risikogebieten sind regelmäßig zu überprüfen (alle 6 Jahre). Dabei ist den voraussichtlichen Auswirkungen des Klimawandels auf das Hochwasserrisiko Rechnung zu tragen. (WHG, 2009)

Allgemein bleibt anzumerken, dass der Klimaschutz und die Vorbeugung gegen die Folgen und Auswirkungen des Klimawandels zwar als allgemeine Grundsätze im WHG verankert sind, jedoch insbesondere zum Klimawandel keine konkreten Vorgaben gemacht werden, mit welchen Methoden diesem Rechnung getragen werden kann oder soll.

Wassergesetze der Länder

Auf der Grundlage des WHG erlassen die Länder im Rahmen ihrer Zuständigkeit eigene Wassergesetze zur Umsetzung und Konkretisierung des Bundesrechts. So haben die Länder die HWRM-RL über das WHG in ihre Wassergesetze adaptiert und die Bewertung des Hochwasserrisikos, sowie die Erstellung von Hochwassergefahrenkarten, Hochwasserrisikokarten und Hochwasserrisikomanagementplänen durchgeführt. Beispielhaft werden im Folgenden die Wassergesetze der Länder Hessen und Bayern betrachtet.

„Länder können im Rahmen der **konkurrierenden Gesetzgebung** nach Art. 72 Abs. 3 Nr. 5 GG in den Landeswassergesetzen nur noch **teilweise Abweichungen** festlegen und **Öffnungsklauseln** des WHG nutzen.“ (Linke, 2019)

Das Hessische Wassergesetz (HWG) legt beispielsweise fest, dass abweichend zum WHG für die Erfassung von Gebieten mit niedriger Hochwasserwahrscheinlichkeit nicht das Wiederkehrintervall von mindestens 200 Jahren zugrunde zu legen ist, sondern das 1,3-fache des Abflusses eines Hochwassers mit Wiederkehrwahrscheinlichkeit von einmal in 100 Jahren (HQ₁₀₀ x 1,3).

Im Rahmen der Vollziehung des Bayerischen Wassergesetzes (BayWG) ist per Ministerialerlass festgelegt, dass bei Neubau, Ausbau oder Änderung von Hochwasserschutzanlagen die Auswirkungen von möglichen Klimaänderungen bei der Festlegung der Bemessungsabflüsse mit einem vorsorgenden Klimaänderungsfaktor zu berücksichtigen sind. Der Klimaänderungsfaktor beträgt bis einschließlich HQ₁₀₀ pauschal 15%. Die statistisch ermittelten Bemessungsabflüsse sind um diesen pauschalen Zuschlag von 15% zu erhöhen. (StMUV, 2009)

Baugesetzbuch

Das Baugesetzbuch (BauGB) regelt, wie die Aufstellung von Bauleitplänen durch Gemeinden durchzuführen sind (§1 Abs. 1 BauGB). Als vorbereitender Bauleitplan wird der Flächennutzungsplan erstellt und als verbindlicher Bauleitplan der Bebauungsplan (§1 Abs. 2 BauGB).

Es ist festgelegt, dass bei der Aufstellung von Bauleitplänen u.a. die Belange des Umweltschutzes, einschließlich des Naturschutzes und der Landschaftspflege zu berücksichtigen sind (§1 Abs. 6 S. 7 BauGB), als auch die Belange des Küsten- oder Hochwasserschutzes und der Hochwasservorsorge, insbesondere die Vermeidung und Verringerung von Hochwasserschäden (§1 Abs. 6 S. 12 BauGB).

3.2 Länderspezifische Anpassungsstrategien

Die Bundesländer haben unterschiedliche Strategien zur Anpassung an den Klimawandel. Um einen Vergleich ziehen zu können, wurden sie in Tabelle 4 mit dem Aktionsplan Anpassung des Bundes verglichen.

Aktionsplan Anpassung des Bundes (APA)

Die Bundesregierung hat 2011 im Rahmen der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel den Aktionsplan Anpassung verabschiedet, welcher 2015 fortgeschrieben wurde. In diesem sind Instrumente und Maßnahmen festgehalten, um Deutschland in verschiedenen Bereichen an den Klimawandel anzupassen. Aus dem Cluster Wasser wurden im Folgenden die Anpassungen des Aktionsplans betrachtet, welche sich auf wasserbauliche Anlagen im Hinblick auf Hochwasser, Niedrigwasser und Sturzfluten beziehen. Diese Instrumente und Maßnahmen wurden in Tabelle 4 mit den Anpassungsstrategien der Bundesländer abgeglichen. (APA II, 2015)

Diese Maßnahmen beziehungsweise Instrumente zur Anpassung von Fließgewässern an den Klimawandel sind nachfolgend kurz erläutert:

Das verstärkte Einrichten von natürlichen Überflutungsflächen und die Rückgewinnung von Retentionsflächen, im Besonderen die Deichrückverlegung, soll dem Hochwasser Platz schaffen, um sich ausbreiten zu können. Die Renaturierung von Fließgewässern und Auen zielt bei dem „Aktionsplan Anpassung“ primär auf die generelle Verbesserung der Gewässerökologie ab, welche durch die Wasserrahmenrichtlinie vorgeschrieben ist, hat aber als Nebeneffekt auch die Anpassung der Flüsse an die Hoch- und Niedrigwasserproblematik. Die letzte Maßnahme ist die Überarbeitung der Betriebs- und Bewirtschaftungspläne für Talsperren, Speicher und Rückhaltebecken, mit dem die Bundesregierung auf Extremniederschlagsereignisse und Hochwasser reagieren möchte und auch Potential zur Bewältigung der Niedrigwasserproblematik sieht. (ebd.)

Tabelle 4: Maßnahmen und Instrumente des Aktionsplan Anpassung der Deutschen Anpassungsstrategie und die Adaption der Länder

Instrument / Maßnahme des Aktionsplan Anpassung der Deutschen Anpassungsstrategie	Adaption von Instrumenten / Maßnahmen der Bundesländer							
	ST ¹	BY ²	TH ³	HE ⁴	NW ⁵	SN ⁶	HB ⁷	RP ⁸
Verstärktes Einrichten von natürlichen Überflutungsflächen bzw. Rückgewinnung von Retentionsflächen (u.a. naturnah gestaltetes Polder)	x	x	x	x				x
Renaturierung von Fließgewässern und Auen	x	x	x	x	x		x	x

Überarbeitung der Betriebs- und Bewirtschaftungspläne für Talsperren, Speicher und Rückhaltebecken	X	X	X		X			
	BW⁹	BE¹⁰	MV¹¹	SH¹²	HH¹³	SL¹⁴	BB¹⁵	NI¹⁶
Verstärktes Einrichten von natürlichen Überflutungsflächen bzw. Rückgewinnung von Retentionsflächen (u.a. naturnah gestaltetes Polder)	X			X				X
Renaturierung von Fließgewässern und Auen	X			X				
Überarbeitung der Betriebs- und Bewirtschaftungspläne für Talsperren, Speicher und Rückhaltebecken								
BW = Baden-Württemberg; BY = Bayern; BE = Berlin; BB = Brandenburg; HB = Bremen; HH = Hamburg; HE = Hessen; MV = Mecklenburg-Vorpommern; NI = Niedersachsen; NW = Nordrhein-Westfalen; RP = Rheinland-Pfalz; SL = Saarland; SN = Sachsen; ST = Sachsen-Anhalt; SH = Schleswig-Holstein; TH = Thüringen.								
¹ (MULE, 2019); ² (StMUV, 2017); ³ (TMUEN, 2019); ⁴ (HMuKLV, 2017); ⁵ (MKULNV, 2011); ⁶ (SMWA, 2012); ⁷ (Senat Böhrnsen III, 2018); ⁸ (MWVLW, 2013); ⁹ (UM, 2015); ¹⁰ (StEP, 2016); ¹¹ (MEID MV, 2020); ¹² (MELUND SH, 2017); ¹³ (LSBG, 2013); ¹⁴ (Saarland Ministerium für Umwelt, 2008); ¹⁵ (MLUK, 2019); ¹⁶ (IMAK, 2015)								

Einige Bundesländer bemühen sich auch darüber hinaus auf die Folgen des Klimawandels bei der Planung und Ertüchtigung wasserbaulicher Anlagen einzugehen. Solche weiterführenden Regelungen und Empfehlungen werden im Weiteren betrachtet.

Sachsen-Anhalt:

In Bezug auf Hochwasser hat Sachsen-Anhalt zusätzlich die Überarbeitung von Flächennutzungs- und Bebauungsplänen, mit gegebenenfalls einer Verweigerung des Baurechts in neu ausgewiesenen Risikogebieten geplant. Zusätzlich möchte Sachsen-Anhalt ein Konzept für ein kommunales Starkregenrisikomanagement erarbeiten und umsetzen. (MULE, 2019)

Bayern:

Als eines von zwei Bundesländern hat Bayern bereits ein konkretes Planungswerkzeug für den Ausbau von Hochwasserschutzanlagen. Geplant wird mit der Bemessungshöhe HQ₁₀₀ + 15% Klimazuschlag. (StMUV, 2009)

Weiter hat Bayern ein Aktionsprogramm zum Schutz vor Hochwasser veröffentlicht, welches nicht direkt als Klimaanpassung betitelt wird, allerdings Aufgrund von vermehrt auftretenden Hochwassern, zuletzt 2013, erstellt wurde. Dort wird zusätzlich zur Schaffung von natürlichen Rückhalteräumen der Ausbau des technischen Hochwasserschutzes geplant. Dabei wird auf das Aufstauen, Durchleiten und Umleiten von Fließgewässern im Hochwasserfall gesetzt, sowie zu einer resilienten Bauweise angeregt. Resiliente Kon-

strukturen sind Bauweisen oder Bauwerke, die überlastbar sein können und in Wechselwirkung mit anderen Systemen stehen, um einen angepassten Schutz zu gewährleisten. (StMUV, 2014)

Thüringen:

Die technischen Hochwasserschutzanlagen wie zum Beispiel Dämme und Hochwasserschutzmauern sollen in Thüringen erweitert, saniert oder auch neu gebaut werden. Zudem soll es ein Kataster von entsprechenden Anlagen geben. Beim Planen, Bauen und Sanieren von Gebäuden sollen Objektschutzmaßnahmen berücksichtigt und hochwassergefährdete Gebäude, Objekte und Infrastruktureinrichtungen angepasst werden. (TMUEN, 2019)

Hessen:

Ein Klimaänderungsfaktor für die Hochwasserabflüsse verschiedener Jährlichkeiten soll für Hessen festgelegt werden, um bei der Konzeption technischer Hochwasserschutzmaßnahmen berücksichtigt zu werden. Dabei wird sich an Bayern und Baden-Württemberg orientiert. (HMUKLV, 2017)

Nordrhein-Westfalen:

Um den Schaden durch Sturzfluten im urbanen Raum zu minimieren, plant Nordrhein-Westfalen Risikomanagementkonzepte zur Vermeidung von Schäden durch Starkregeneignisse. Dabei sollen geeignete planerische, technische und administrative Maßnahmen berücksichtigt werden. (MKULNV, 2011)

Rheinland-Pfalz:

Rheinland-Pfalz verfolgt den Ansatz keine generell gültigen Maßnahmen für das ganze Land zu implementieren, sondern gefährdeten Kommunen Informationen zu liefern und beratend zur Seite zu stehen. So hat Rheinland-Pfalz die Gefahr für Hochwasser am Oberrhein als besonders brisant eingestuft, und unterstützt dortige Kommunen nun in folgenden Anpassungen: Deichrückverlegung und -ausbau, dem Hochwasserrückhalt durch Schaffung von Retentionsflächen und Hochwasserrückhalteräumen (Polder) sowie Reserveräume für Extremhochwasser (HQ₂₀₀ und größer) sollen geschaffen werden. (MWVLW, 2013) (SGD Süd, 2020)

Baden-Württemberg:

Der „Lastfall Klimawandel“ soll bei der Planung von technischen Hochwasserschutzmaßnahmen untersucht und standortspezifisch einbezogen werden. Bei Anlagen im südlichen Schwarzwald sowie den Oberläufen von Neckar und Donau soll künftig ein HQ₁₀₀ von +25% Klimaänderungsfaktor eingeplant werden. In den übrigen Landesteilen +15%. Wenn sich nach der Untersuchung ein „Lastfall Klimaänderung“ als nicht notwendig zeigt oder aus wirtschaftlichen Gründen nicht berücksichtigt wird, soll dennoch bei der Planung und Ausführung die Möglichkeit zur Aufrüstung berücksichtigt werden. (LUBW, 2012)

Schleswig-Holstein:

Hochwasserschutzmaßnahmen sind so zu konzipieren, dass eine kostengünstige Anpassung möglich ist. (MELUND SH, 2017)

Hamburg:

Die Bemessungshöhe für Deiche in Hamburg wurde aufgrund von neuen Erkenntnissen über die Folgen und Auswirkungen des Klimawandels erhöht. Deiche werden nun mit NN + 8,10 Meter bemessen, anstatt mit NN + 7,30 Meter. (LSBG, 2013)

4. Diskussion und Empfehlungen

Das Ziel dieser Bachelorarbeit ist es, den Einfluss des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft, explizit auf die deutschen Fließgewässer und die länderspezifische Berücksichtigung bei der Planung und Ertüchtigung wasserbaulicher Anlagen zu untersuchen.

Durch die Ergebnisse der Untersuchung wird deutlich, dass die Anpassungsstrategie vieler Länder noch erweitert werden sollte.

Die zu Beginn der Arbeit getroffene Annahme, dass sich der Klimawandel auf die deutschen Fließgewässer auswirkt, konnte im Laufe der Recherche bestätigt werden. Durch immer weiter steigende Temperaturen in den Winter- und Sommermonaten und eine Veränderung des Niederschlagsverhaltens, werden sich auch die Abflüsse ändern. Extremereignisse werden zunehmen und stellen uns vor neue Herausforderungen. Die Problematiken, welche der Klimawandel mit sich bringt, werden der Politik, Wirtschaft und Gesellschaft in den letzten Jahren zunehmend bewusst.

Während der Untersuchung von Anpassungsstrategien der Länder an die Folgen des Klimawandels an deutschen Fließgewässern ist es trotz alledem auffällig, dass vor allem Maßnahmen implementiert wurden, die zur Wissensgenerierung und Informationsbereitstellung beitragen. Gründe dafür könnten unter anderem Unsicherheit, fehlender Handlungswillen und mangelnde Ressourcen sein. (Vetter, et al., 2017)

Von allen 16 Bundesländern haben nur Sachsen-Anhalt, Bayern und Thüringen die Vorgaben des APA für ihre eigene Anpassungsstrategie komplett übernommen, während einige Bundesländer wie Hessen und Schleswig-Holstein Teile adaptiert haben. Schleswig-Holstein aber hat weiter den Beschluss getroffen, mit genaueren Vorgaben zu Regelungen und Empfehlungen für die Klimaanpassung wasserbaulicher Anlagen zu warten, bis die Informationsgrundlage besser ist. Anders verhält es sich bei Mecklenburg-Vorpommern, das sich aktuell noch in der Wissensgenerierung befindet und noch keine ausgearbeitete Anpassungsstrategie mit dem Fokus auf Fließgewässer und Sturzfluten hat und die Maßnahmen des APA auch nicht berücksichtigt. Sachsen wartet ebenfalls und plant erst unter der 2019 gewählten Regierung eine Anpassung der Wasserwirtschaft an den Klimawandel auszuarbeiten.

Ein Problem, welches zu solch unterschiedlich ausgearbeiteten Anpassungen in Deutschland führt, sind die Länderzuständigkeiten beziehungsweise der Föderalismus. Dieser eignet sich gut, um regionale Problematiken zu sehen und Lösungsstrategien zu entwickeln, z.B. für lokale, urbane Ereignisse wie Sturzfluten. Bei Sturzfluten ist es sinnvoll eigene Strategien und Anpassungen für Gebiete zu finden, da die Wirkungsbereiche auf regionaler Ebene liegen und die Rahmenbedingungen sehr variieren. Fließgewässer halten sich jedoch nicht an Grenzen eines Bundeslandes und durchfließen im Normalfall mehrere Hoheitsgebiete. Dies führt zu größeren Hürden bei der Umsetzung von Maßnahmen der

Gewässeranpassung an den Klimawandel. Dieses Problem wurde mit der „Föderalismusreform“ von 2006 gemildert, da der Bund nun einheitliche Vorgaben für Gesamtdeutschland im Wasserrecht erlassen kann. Jedoch gelten diese Vorgaben nicht für jeden Bereich der Wasserwirtschaft. So fällt der Hochwasserschutz weiterhin unter die Länderzuständigkeit, was zu Konflikten zwischen Ober- und Unterliegern führen kann, gerade bei Fließgewässern die durch viele urbanisierte Landflächen fließen. Durch die Vorgaben des Bundes mit dem nationalen Hochwasserschutzprogramm wurde versucht dies zu beheben, indem für Flussgebiete zusammenhängende Projekte gefunden werden sollen. (BMU, 2020) Dieses Vorhaben wurde erst nach den verheerenden Hochwassern im Mai/Juni 2013 beschlossen. Für die Zukunft ist zu hoffen, dass Beschlüsse ähnlicher Tragweite präventiv und nicht nachsorgend getroffen werden.

Es ist als bedauerlich, dass der APA in vielen Bundesländern nicht in die Anpassungspläne integriert wurde. Diese Maßnahmen würden zu einer Anpassung sowohl der Hochwasser- als auch der Niedrigwasserproblematik, welche zunehmend zu erwarten sind, beitragen. Die Gewässerretention durch planerische Renaturierung oder die naturnahe Gestaltung von Poldern, der Anschluss von Altarmen und die Deichrückverlegung als Werkzeuge zur Anpassung der Wasserwirtschaft sollten vermehrt vorangetrieben werden. Ebenso wie die automatisierte Steuerung des Betriebs von Talsperren und Speichern, um schneller und zuverlässiger agieren zu können, sowie die neue Bemessung von Stauanlagen in Gebieten, in denen der Niederschlag stark durch den Klimawandel beeinflusst wird, um bei Notwendigkeit zusätzlichen Stauraum zu schaffen.

Zu ergänzen gilt es, dass gerade in Gebieten in denen Retentionsflächen schwierig bereitzustellen sind, genügend mobile Hochwasserschutzwände bereitgehalten werden müssen.

Länderspezifisch geregelte und konkrete Planungswerkzeuge für wasserbauliche Anlagen gibt es bis auf die Ausnahmen Bayern und Baden-Württemberg nicht. In Bayern und Baden-Württemberg ist es geregelt, dass auf die Bemessungsgröße HQ_{100} ein Klimazuschlag von +15% beziehungsweise +25% aufgeschlagen werden muss. Hessen und Bremen prüfen aktuell, ob eine Einführung von vergleichbaren vorgeschriebenen Planungswerkzeugen zur Anpassung an den Klimawandel innerhalb der Wasserwirtschaft sinnvoll ist, während Thüringen sich dagegen entschieden hat und von den aktuell ermittelten Jährlichkeiten ($HQ_{20,100,200}$) ausgeht.

Grundsätzlich wäre jedoch ein genereller Klimazuschlag als sinnvoll zu erachten, da die Hochwasserabflüsse nachweislich steigen werden. Ein festgeschriebener Klimazuschlag garantiert eine Berücksichtigung der Klimaänderung bei wasserbaulichen Anlagen unabhängig von der planenden Institution und erhebt die Anpassung aus dem Stand des Abwägungstatbestandes heraus. Die Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (2011) warnt allerdings eben vor solch pauschal vorgeschriebenen Klimazuschlägen. Durch die Reduktion der Anpassungsdiskussion auf einzelne Klimazuschläge, könne es zu

Verzerrungen von Kenntnisständen und Klimafolgen kommen. Diese Warnung ist berechtigt und sollte bei der Diskussion zur Klimaanpassung immer wieder ins Gedächtnis gerufen werden. Trotz allem ist ein geregelter Klimazuschlag sinnvoll, um eine Art von Mindestberücksichtigung zu erzielen, dies ersetzt aber nicht weitere Anpassungsstrategien. So könnten gesellschaftliche Eigenheiten, wie das oftmals nur temporär vorhandene gesteigerte Bewusstsein nach lokalen Schadensereignissen umgangen werden und eine dauerhafte Berücksichtigung wäre gewährleistet.

Thüringen plant die technischen Hochwasserschutzanlagen zu erweitern, zu sanieren oder neu zu bauen. Dies ist, explizit für urbanisierte Gebiete, in Gesamtdeutschland zu empfehlen. Das besondere Augenmerk sollte dabei auf extremer werdende Niederschlagsereignisse und höhere Wasserstände gelegt werden. Bayerns Plan für einen resilienten Hochwasserschutz bietet eine gute Möglichkeit der Anpassung.

Weiter kann mit der Sanierung und Erweiterung von Hochwasserschutzanlagen die Gefahr von Erosion durch Extremereignisse eindämmt werden. Gerade Deiche sind durch einfache Erhöhung erosionsanfälliger. Erosion könnte vor allem eine Gefahr bei Starkniederschlag und daraus resultierenden Sturzfluten sein. Durch die Erosion könnten Gerinne verstopfen und der Abfluss sich neue, schadensbringendere Wege suchen. Daher ist es wichtig zur Vorbeugung gegen Sturzfluten und deren Auswirkungen nicht nur die Versickerung von Niederschlag zu verbessern, worauf aktuell das Hauptaugenmerk liegt, sondern auch die Gerinne nach möglichen Engstellen zu untersuchen und diese aufzulösen. Dies sollte auch bei dem Neubau und der Sanierung von wasserbaulichen Anlagen beachtet werden.

Ebenfalls sollte geprüft werden, ob die Durchlässigkeit erhöht werden kann, um höhere Abflussspitzen abführen zu können. Erhöhte Durchlässigkeit kann im Flussbett, Gerinne oder auch in verrohrten Vorflutern, die oft nur auf die Siedlungsentwässerung bemessen sind, geschaffen werden.

Da auf der Länder- und Bundesebene bei der Entwicklung und Verabschiedung von Gesetzen oder Vorschriften relativ lange Zeiträume benötigt werden, sollten Länder die Weiterbildung in Bezug auf klimaangepasstes Planen und Bauen, explizit im Bereich Hochwasser, von Architekten, Ingenieuren und Handwerkern fördern. So würden auch ausgesprochene Empfehlungen, wie in Schleswig-Holstein und Baden-Württemberg, Hochwasserschutzmaßnahmen so zu konzipieren, dass eine einfache und kostengünstige Aufstockung möglich ist, besser in die Tat umgesetzt werden können. Rheinland-Pfalz unterstützt bereits aktiv seine Kommunen bei der Anpassung an den Klimawandel und fördert die Weiterbildung von Verwaltungen im gesamten Themenfeld „Klimawandel und Anpassung“. Das Land unterstützt Kommunen mit Informationen, beratenden Stellen und finanziellen Mitteln zu der Erstellung von Hochwasserrisikomanagementplänen und Hochwasserschutzkonzepten. Dies soll den Kommunen das Thema näherbringen und Eigeninitiative zur Anpassung fördern.

Keines der Länder der Bundesrepublik Deutschland hat explizite Anpassungsstrategien an Niedrigwasser. Meist werden hochwasservorbeugende Maßnahmen geplant und dann erwähnt, dass diese auch der Niedrigwasser Problematik vorbeugen würden, beispielsweise Retentionsflächen und Auen. Diese halten das Wasser länger in der Fläche und führen zu einem kontinuierlicheren Abfluss bei geringem Durchfluss während Trockenperioden. Explizite Anpassungsstrategien an Niedrigwasser sind weniger präzise, da diese aktuell noch kaum Beachtung in der Anpassung finden und sowohl der Grundstein erst gelegt werden muss, als auch die Datengrundlage zunächst verbessert werden sollte. So gibt es Bundesländer wie Bayern, welche die Wissensgenerierung über Niedrigwasserereignisse in ihrem Anpassungsplan verankert haben. Mit einer verbesserter Datengrundlage sollten dann Notfallpläne zum Management von extremen Niedrigwasserperioden entwickelt werden. Darüber hinaus wäre es mit Hilfe der besseren Daten empfehlenswert, die Standorte von Wasserkraftwerken zu optimieren.

Abschließend sind die Maßnahmen der Länder in großen Teilen als unzureichend einzustufen. Die KLIWA-Länder Bayern, Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz sind in vielen Punkten als klarer Vorreiter bei der Anpassung der Wasserwirtschaft an den Klimawandel zu sehen. Wenn es zwischen mehr Bundesländern innerhalb Deutschlands ähnliche Kooperationsgemeinschaften geben würde, könnte die Wissensgenerierung schneller voranschreiten und der Klimawandel und seine Auswirkungen auf die Wasserwirtschaft würden mehr Willen zur Anpassung bundesweit generieren.

Handlungsempfehlungen

Nach gründlicher Betrachtung der einzelnen Länderstrategien und einer kritischen Bewertung zeigt sich, dass aktuell noch keine der Anpassungsstrategien ausreichend für die bevorstehenden Änderungen ist. Die Rechtslage der Gewässerzuständigkeiten macht es schwer bis unmöglich eine einheitliche Anpassung für ganz Deutschland vorzunehmen. Mit Blick auf die Unterschiede von Fließgewässern und deren Einzugsgebieten ist dies aber auch nicht wünschenswert. Viele Länder haben gute Ideen für eine Anpassungsstrategie. Diese sind natürlich primär auf die jeweilige Region zugeschnitten, allerdings könnten die Länder in Teilen voneinander lernen und so ihre eigenen Strategien verbessern.

In Tabelle 5 werden Handlungsempfehlungen auf Grundlage der oben durchgeführten Diskussion der Ergebnisse ausgesprochen. Dabei wird direkt angegeben, auf welchen Anpassungsschwerpunkt die Handlung abzielt. Wichtig ist es Anpassung als einen dynamischen Prozess zu verstehen, und ausgesprochene Strategien bei neuem Erkenntnisstand zu erweitern oder zu ändern.

Tabelle 5: Handlungsempfehlungen

Anpassungsmaßnahmen	Hochwasser	Niedrigwasser	Sturzfluten in Flüssen
Wissensgenerierung und Informationsbereitstellung: Empfohlen durch Kooperationsgemeinschaften, mit verstärktem Augenmerk auf Niedrigwasser und Sturzfluten	X	X	X
APA-Maßnahmen adaptieren	X	X	
Festlegung eines Klimazuschlags zur Bemessung von wasserbaulichen Anlagen	X		
Sanierung, Erweiterung und Neubau technischer Hochwasserschutzanlagen (Beachtung von höheren Wasserständen und den Schutz vor Erosion)	X		X
Die Erhöhung der Durchlässigkeit für Fließgewässer	X	X	X
Förderung der Weiterbildung in Bezug auf Klimaangepasstes Planen und Bauen von Architekten, Ingenieuren und Handwerkern	X		X
Unterstützung von Kommunen durch Beratungsstellen	X	X	X
Niedrigwassermanagementpläne aufstellen		X	
Standortüberprüfung von Wasserkraftanlagen (im Hinblick auf Niedrigwasser)		X	
Aufstellen eines Leitfadens für bauliche Gewässermaßnahmen zur Zusammenführung verschiedener Wassernutzer		X	

Im Zuge dieser Arbeit wurden die Folgen des Klimawandels auf die Fließgewässer innerhalb Deutschlands und die Änderung der Abflüsse betrachtet. So sind diese Erkenntnisse nicht für andere Länder oder andere Gewässertypen wie Stillgewässer aussagekräftig. Bei der Berücksichtigung von möglichen Anpassungen wasserbaulicher Anlagen wurde sich ebenfalls auf Deutschland und die Bundesländer konzentriert. Die Berücksichtigung des Klimawandels innerhalb einzelner Kommunen wurde nicht mit einbezogen.

Es wäre eine sinnvolle Fortführung der Untersuchung, sie in unterschiedlichen Spektren zu vertiefen, um ein noch umfassendes Bild zu erlangen.

So wäre der Vergleich mit anderen EU Staaten mit ähnlicher Vegetationszone vor allem im Hinblick auf deren Forschungsstand interessant. Sowohl die Schweiz als auch Österreich haben in diesem Gebiet bereits geforscht und durch einen Vergleich könnten sich neue Felder öffnen, in denen noch Handlungs- und Forschungsbedarf besteht.

Ebenso interessant wäre die genauere Betrachtung einzelner Kommunen oder Flüsse, um die Umsetzung verschiedener Anpassungen näher untersuchen zu können.

Auch einzelne Flussabschnitte an denen wasserbauliche Anlagen stehen, wie beispielsweise Wasserkraftanlagen, könnten näher betrachtet werden, um die Auswirkungen der sich ändernden Abflüsse im Einzelnen zu bewerten.

Aus aktuellem Anlass gilt es noch zu erwähnen, dass das Aufgrund der Covid-19 Pandemie erlassene „Konjunkturpaket des Bundes“ als eine verpasste Chance zu sehen ist, die Anpassungen an den Klimawandel voran zu treiben. Die Geldmittel umfassen circa 130 Milliarden Euro, doch zum Beispiel die Renaturierung von Gewässern finden darin keine Beachtung. Diese werden nur im „Zukunftspaket für einen Aufbruch nach der Krise“ von der Bundestagsfraktion der Grünen beachtet, obwohl bekannt ist, dass Pandemien durch die massiven ökologischen Einwirkungen des Menschen begünstigt werden. (Egger, 2020)

5. Fazit

Fließgewässer in Deutschland unterliegen bereits den Auswirkungen des Klimawandels. Rhein und Donau verzeichnen in den Sommermonaten schon jetzt Trends zu weniger Abflüssen und im Winter zu mehr. Während hingegen die Elbe seit den vergangenen 150 Jahren einen jahreszeitlich unabhängigen Trend zu weniger Abfluss hat. In der Zukunft ist nicht damit zu rechnen, dass sich die Auswirkungen verkleinern oder auf heutigem Niveau bleiben werden. Abflussregime werden sich verändern und verschieben und die Abflussmaxima und -minima werden extremer. Die niederschlagsreichen Wintermonate werden in großen Teilen Deutschlands mehr Abfluss hervorbringen und in den Sommermonaten wird es längere Niedrigwasserperioden geben. Starkregen wird zunehmen und die Gefahr von Sturzfluten in Flüssen wird steigen.

Die Anpassungsstrategien der Länder gehen aktuell primär auf die Hochwasserproblematik ein. Während einige Länder wie Sachsen-Anhalt, Bayern und Thüringen sich stark an dem „Aktionsplan Anpassung des Bundes“ orientieren, setzen andere Länder wie Rheinland-Pfalz auf Strategien der Förderung von Anpassung innerhalb der Kommunen, anstatt Maßnahmen auf Länderebene zu beschließen. Immer noch gibt es einige Länder, die wenig aktiv in der Anpassung von Fließgewässern sind. Dies ist zum Beispiel bei Sachsen oder Mecklenburg-Vorpommern der Fall.

Als Hauptgrund vieler Länder für die Zurückhaltung bei der Erstellung und Entwicklung von Anpassungsmaßnahmen sind die unsicheren und wenig validierten Aussagen der Klimaänderungswirkung auf Fließgewässer zu nennen. Als herausragende Arbeit kann man den KLIWA-Zusammenschluss sehen, der seit 1999 besteht und sich mit der Frage beschäftigt, wie sich der Klimawandel auf die Wasserwirtschaft und Fließgewässer auswirkt und wie darauf reagiert werden kann. Nach diesem Vorbild sollten mehr Länder agieren.

Das Treffen von regionsspezifisch reliablen Aussagen überschreitet die Grenzen dieser Arbeit. Dafür bedarf es genauerer und gezielterer Betrachtung. Fortführungen und Erweiterungen dieser Arbeit könnten zudem der direkte Vergleich von Anpassungsstrategien an zwei Ausgewählten Fließgewässern oder auch der Vergleich von Länderanpassungsstrategien auf europäischer Ebene sein.

Durch die Komplexität des Klimawandels und den Wechselwirkungen von Wasserhaushaltsgrößen, der Gewässerzuständigkeiten und der Rechtsverordnungen ist das Ergebnis dieser Arbeit als Überblick und Anregung zu verstehen.

Literaturverzeichnis

- APA II. (2015). *Fortschrittsbericht zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel*. Bundesregierung, Berlin.
- Bülow, K., Hennemuth, B., Hoffmann, P., Keup-Thiel, E., Kochanowski, A., Krüger, O., . . . Schoetter, R. (2012). *Statistische Verfahren in der Auswertung von Klimamodell- und Impaktmodelldaten. eingesetzt in KLIMZUG und anderen Projekten sowie Institutionen, die sich mit Klimafolgen befassen*.
- BauGB. (23. Juni 1960). Baugestzbuch. *Neugefasst durch Bek. v. 3.11.2017 I 3634. geändert durch Art. 6 G v. 27.3.2020 I 587*.
- BMU. (2020). *Nationales Hochwasserschutzprogramm*. Abgerufen am 8. Juni 2020 von Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit: <https://www.bmu.de/faqs/nationales-hochwasserschutzprogramm/>
- Bormann, H., & Casper, M. (2016). Einfluss des Klimas und des Klimawandels auf den Wasserkreislauf. In H. Bormann, M. Casper, N. Fohrer, & K. Miegel (Hrsg.), *Hydrologie*. UTB.
- Bosch & Partner. (2019). *Indikatoren-Factcheet: Niedrigwasser. Indikatoren für die Deutsche Anpassungsstrategie. WW-I-4*. Abgerufen am 5. Juni 2020 von Umweltbundesamt: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/380/dokumente/ww-i-4_indikator_niedrigwasser_2019_0.pdf
- Bronstert, A., Bormann, H., Bürger, G., Haberlandt, U., Hattermann, F., Heistermann, M., . . . Petrow, T. (2017). Hochwasser und Sturzfluten an Flüssen in Deutschland. In G. Prof. Dr. Brasseur, D. Prof. Dr. Jacob, & S. Schuck-Zöller (Hrsg.), *Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven*. Springer Spektrum.
- Deutshländer, T., & Mächel, H. (2017). Temperatur inklusive Hitzewellen. In G. Basseur, D. Jacob, & S. Schuck-Zöller (Hrsg.), *Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven*. Springer Spektrum.
- DWD. (2020). *Starkregen*. (DWD) Abgerufen am 6. Juni 2020 von Wetterlexikon: <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=102248&lv3=102572>
- Egger, P. (11. Juni 2020). Zeit für die Wende. *der Freitag. Die Wochenzeitung*(Nr. 24).
- Günther, T. (2004). Langzeitverhalten hydrometeorologischer Größen. In Arbeitskreis KLIWA (Hrsg.), *2. KLIWA-Symposium am 03. und 04.05.2004 in Würzburg*.

Fachvorträge. Klimaänderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft, Heft 4, S. 37-56. Würzburg.

Gürke, S., Bender, J., & Jensen, J. (2018). Simulation von Starkniederschlägen im Stadtgebiet Siegen - Möglichkeiten und Grenzen topografischer Gefährdungsanalysen. In B. Lehmann, & B. Schmalz (Hrsg.), *Tagungsband zum 20. Treffen junger WissenschaftlerInnen deutschsprachiger Wasserbauinstitute vom 29. bis 31. August 2018 in Darmstadt, Heft 156*. Darmstadt.

Hattermann, F. F., Weiland, M., Huang, S., Krysanova, V., & Kundzewicz, Z. (2011). *Model-Supported Impact Assessment for the Water Sector in Central Germany Under Climate Change - A Case Study*. Abgerufen am 2. Juni 2020 von <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s11269-011-9848-4.pdf>

HMUKLV. (2017). *Integrierter Klimaschutzplan. Hessen 2025*. Wiesbaden: Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz.

HWRM-RL. (07. November 2007). *RICHTLINIE 2007/60/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 23. Oktober 2007 über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken*. Europäische Union.

IKSR. (2011). *Szenarienstudie für das Abflussregime des Rheins. Stand 2011*. Abgerufen am 24. Mai 2020 von https://www.iksr.org/fileadmin/user_upload/DKDM/Dokumente/Fachberichte/DE/rp_De_0188.pdf

IMAK. (2015). *Umsetzungsbericht zu den Empfehlungen der Regierungskommission Klimaschutz. Maßnahmenübersicht Klimafolgenanpassung. Anlage 2. Interministerielle Arbeitskreis "Niedersächsische Klimapolitik"*.

IPCC. (2014a). *Klimaänderungen 2014. Synthesebericht. Beitrag der Arbeitsgruppen I, II und III zum Fünften Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC)*. (R. Pachauri, L. Meyer, Hrsg., & B. 2. Deutsche Übersetzung durch Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, Übers.) Genf.

IPCC. (2014b). *Klimaänderungen 2014: Synthesebericht. Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger*. Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderung. Genf, Schweiz: IPCC.

Jacob, D., Bülow, K., Kotova, L., Moseley, C., Petersen, J., & Rechid, D. (2014). *Regionale Klimaprojektionen für Europa und Deutschland: Ensemble-Simulationen für die Klimafolgenforschung*. Abgerufen am 17. Mai 2020 von https://www.climate-service-center.de/imperia/md/content/csc/csc_report6.pdf

- Jonkman, S. N. (2005). *Global Perspectives on Loss of Human Life Caused by Floods*. Abgerufen am 10. Juni 2020 von <https://link.springer.com/article/10.1007/s11069-004-8891-3#citeas>
- Kaspar, F., & Mächel, H. (2017). Beobachtung von Klima und Klimawandel in Mitteleuropa und Deutschland. In G. Prof. Dr. Brasseur, D. Prof. Dr. Jacob, & S. Schuck-Zöller (Hrsg.), *Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven*. Springer Spektrum.
- Klein, B., Lingemann, I., Krahe, P., & Nilson, E. (2011). Auswirkungen des Klimawandels auf die Donau. Einfluss des Klimawandels auf mögliche Änderungen des Abflussregimes an der Donau im 20. und 21. Jahrhundert. In KLIWA (Hrsg.), *KLIWA Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland - 2. Statuskonferenz*, (S. 111-116). Berlin.
- KLIWA. (2018a). *KLIWA-Kurzbericht. Ergebnisse gemeinsamer Abflussprojektionen für KLIWA und Hessen basierend auf SRES A1B*. Abgerufen am 10. Juni 2020 von https://www.kliwa.de/_download/6-KLIWA_Kurzbericht_Abflussprojektionen_final.pdf
- KLIWA. (2018b). *Niedrigwasser in Süddeutschland. Analysen, Szenarien und Handlungsempfehlungen*. Arbeitskreis KLIWA.
- KLIWA. (2019). *Starkniederschläge. Entwicklung in Vergangenheit und Zukunft - Kurzbericht* -. Abgerufen am 8. Juni 2020 von https://www.kliwa.de/_download/KLIWA-Kurzbericht_Starkregen.pdf
- KLIWA. (2020). *KLIWA. Klimaveränderung und Wasserwirtschaft*. Abgerufen am 10. Juli 2020 von Niedrigwasser. Langzeitverhalten (Vergangenheit): <https://www.kliwa.de/hydrologie-niedrigwasser-langzeitverhalten.htm>
- Komischke, H. (2013). 5. KLIWA-Symposium. am 6. und 7. Dezember 2012 in Würzburg. Fachvorträge. Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft. In KLIWA (Hrsg.). *Heft 19*. KLIWA.
- Kunstmann, H., Wanger, C., Fröhle, P., Smiatek, G., Marx, A., & Hattermann, F. F. (2017). Wasserhaushalt. In G. Prof. Dr. Brasseur, D. Prof. Dr. Jacob, & S. Schuck-Zöller (Hrsg.), *Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven*. Springer Spektrum.
- LfU. (2018). *Auwirkungen auf Niedrigwasserabflüsse*. Abgerufen am 11. Juni 2020 von Bayrisches Landesamt für Umwelt: https://www.lfu.bayern.de/wasser/klima_wandel/auswirkungen/niedrigwasser_abfluesse/index.htm

- Linke, H. J. (09. Juli 2019). *Umweltrecht - Wasser. Plaungs-, Boden-, Bau- und Umweltrecht*. Darmstadt.
- LSBG. (2013). *Planung und Entwurf Hochwasserschutz*. Abgerufen am 23. Mai 2020 von Freie und Hansestadt Hamburg Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer: <https://lsbg.hamburg.de/planung-und-entwurf-hochwasser/>
- LUBW. (2012). *Hochwasserereignisse nehmen weiter zu*. Abgerufen am 2. Juni 2020 von Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg: <https://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/klimawandel-und-anpassung/hochwasser>
- MEID MV. (2020). *Aktionsplan Klimaschutz Mecklenburg-Vorpommern 2019. Teil B - Klimaschutzaktionen*. Ministerium für Energie, Infrastruktur und Digitalisierung Mecklenburg-Vorpommern.
- MELUND SH. (2017). *Anpassung an den Klimawandel. Fahrplan für Schleswig-Holstein*. Kiel: Schleswig-Holstein Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt, Natur und Digitalisierung.
- Merz, B. (2013). *Steigende Schäden trotz großer Aufwendungen im Hochwasserschutz? Land Unter. Leben mit Extremhochwässern*. Kerner von Marilaun.
- MKULNV. (2011). *Klimawandel und Wasserwirtschaft. Maßnahmen und Handlungskonzepte in der Wasserwirtschaft zur Anpassung an den Klimawandel*. Düsseldorf: Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen.
- MLUK. (2019). *natürlich. nachhaltig. Brandenburg. Nachhaltigkeitsstrategie für das Land Brandenburg. Fortschreibung 2019*. Ministerium für Ländliche Entwicklung, umwelt und Landwirtschaft des Landes Brandenburg.
- Mudelsee, M. (2017). *Exkurs: Unsicherheiten bei der Analyse und Attribution von Hochwasserereignissen*. In G. Prof. Dr. Brasseur, D. Prof. Dr. Jacob, & S. Schuck-Zöller (Hrsg.), *Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven*. Springer Spektrum.
- MULE. (2019). *Strategie des Landes zu Anpassung an den Klimawandel. Fortschreibung. Stand Februar 2019*. Magdeburg: Sachsen-Anhalt Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft und Energie.
- MWVLW. (2013). *Klimawandelbericht - Grundlagen und Empfehlungen für Naturschutz und Biodiversität, Boden, Wasser, Landwirtschaft, Weinbau und Wald*. Mainz: Ministerium für Wirtschaft, Klimaschutz, Energie und Landesplanung Rheinland-Pfalz.

- Petrow, T., & Merz, B. (2009). Trends in flood magnitude, frequency and seasonality in Germany in the period 1951–2002. *Journal of Hydrology*, 371, 129-141.
- Roers, M., & Wechsung, F. (2015). Neubewertung der Auswirkung des Klimawandels auf den Wasserhaushalt im Elbegebiet. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*(59. Jahrgang. Heft 3), S. 109-119.
- Saarland Ministerium für Umwelt. (2008). *Saarländisches Klima-Schutzkonzept 2008-2013. Klima schützen - die Klimafolgen bewältigen*. Saarland Ministerium für Umwelt.
- Schwetz, H., & Überwimmer, F. (2015). Vermeidung und Verminderung von Hochwasserrisiken. Avoiding and mitigating flood risks. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 67.
- Senat Böhrnsen III. (2018). *Klimaanpassungsstrategie. Bremen.Bremerhaven*. Bremen: Der Senator für Umwelt, Bau und Verkehr .
- SGD Süd. (2020). *Hochwasserschutz*. Abgerufen am 3. Juni 2020 von Rheinland-Pfalz Struktur und Genehmigungsdirektion Süd: <https://sgdsued.rlp.de/de/themen/hochwasserschutz/>
- SMWA. (2012). *Maßnahmenplan zum Energie- und Klimaprogramm Sachsen 2012*. Sächsisches Staatsministerium für Wirtschaft, Arbeit und Verkehr .
- Steinbauer, A., Komischke, H., Kolokotronis, V., Meuser, A., Iber, C., Rauthe, M., & Deutschländer, T. (2016). *Klimawandel in Süddeutschland. Veränderungen von meteorologischen und hydrologischen Kenngrößen. Klimamonitoring im Rahmen der Kooperation KLIWA. Monitoringbericht 2016*. KLIWA.
- StEP. (2016). *Stadtentwicklungsplan Klima. KONKRET. Klimaanpassung in der Wachsenden Stadt*. Berlin: Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt.
- StMUV. (2009). *AZ - 54c-U4429.0-2009/4-2 -*. Bayern: Bayrisches Ministerium für Umwelt und Gesundheit.
- StMUV. (2014). *Hochwasserschutz Aktionsprogramm 2020plus. Bayerns Schutzstrategie. Ausweiten • Intensivieren • Beschleunigen*. München: Bayrisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz.
- StMUV. (2017). *Bayrische Klima-Anpassungsstrategie. Ausgabe 2016*. München: Bayrisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz.
- TMUEN. (2019). *Integriertes Maßnahmenprogramm zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels im Freistaat Thüringen. Impakt II*. Erfurt: Freistaat Thüringen Ministerium für Umwelt, Energie und Naturschutz.

- UBA. (August 2011). *Themenblatt: Anpassung an den Klimawandel. Hochwasserschutz*. Abgerufen am 18. Mai 2020 von Umweltbundesamt: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/364/publikationen/kompass_themenblatt_hochwasserschutz_2015_net.pdf
- UM. (2015). *Strategie zur Anpassung an den Klimawandel in Baden-Württemberg. Vulnerabilitäten und Anpassungsmaßnahmen in relevanten Handlungsfeldern*. Stuttgart: Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg.
- Vetter, A., Chrischilles, E., Eisenack, K., Kind, C., Mahrenholz, P., & Pechan, A. (2017). Anpassung an den Klimawandel als neues Politikfeld. In G. Brasseur, D. Jacob, & S. Schuck-Zöller (Hrsg.), *Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven*. SpringerSpektrum.
- WHG. (31. Juli 2009). *Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz - WHG)*. Zuletzt geändert durch ART. 2 G v. 4.12.2018 I 2254.
- Wolf-Schumann, U., & Dumont, U. (2012). *Klimafolgen für die Wasserkraftnutzung in Deutschland und Aufstellung von Anpassungsstrategien*. (Umweltbundesamt, Hrsg.) Abgerufen am 17. April 2020 von Umweltbundesamt: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/klimafolgen-fuer-wasserkraftnutzung-in-deutschland>
- WRRL. (23. Oktober 2000). Wasserrahmenrichtlinie. *RICHTLINIE 2000/60/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik*.
- Zeit. (6.. Juni 2013). *Hochwasser. Deggendorf versinkt im Wasser*. Abgerufen am 10. Juli 2020 von Zeit online: <https://www.zeit.de/gesellschaft/zeitgeschehen/2013-06/fs-hochwasser-deggendorf-2>

Abschlussarbeit von

Frau Leah Lücke

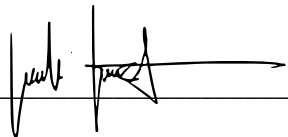
Erklärung zur Abschlussarbeit gemäß § 22, Abs. 7 APB

Hiermit versichere ich, die vorliegende Abschlussarbeit ohne Hilfe Dritter nur mit den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt zu haben.

Alle Stellen, die aus den Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht worden.

Diese Arbeit hat in gleicher Form oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Darmstadt, den 26. Juli 2020

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized, overlapping loops and a long horizontal stroke extending to the right, positioned above a horizontal line.

Unterschrift

Anhang

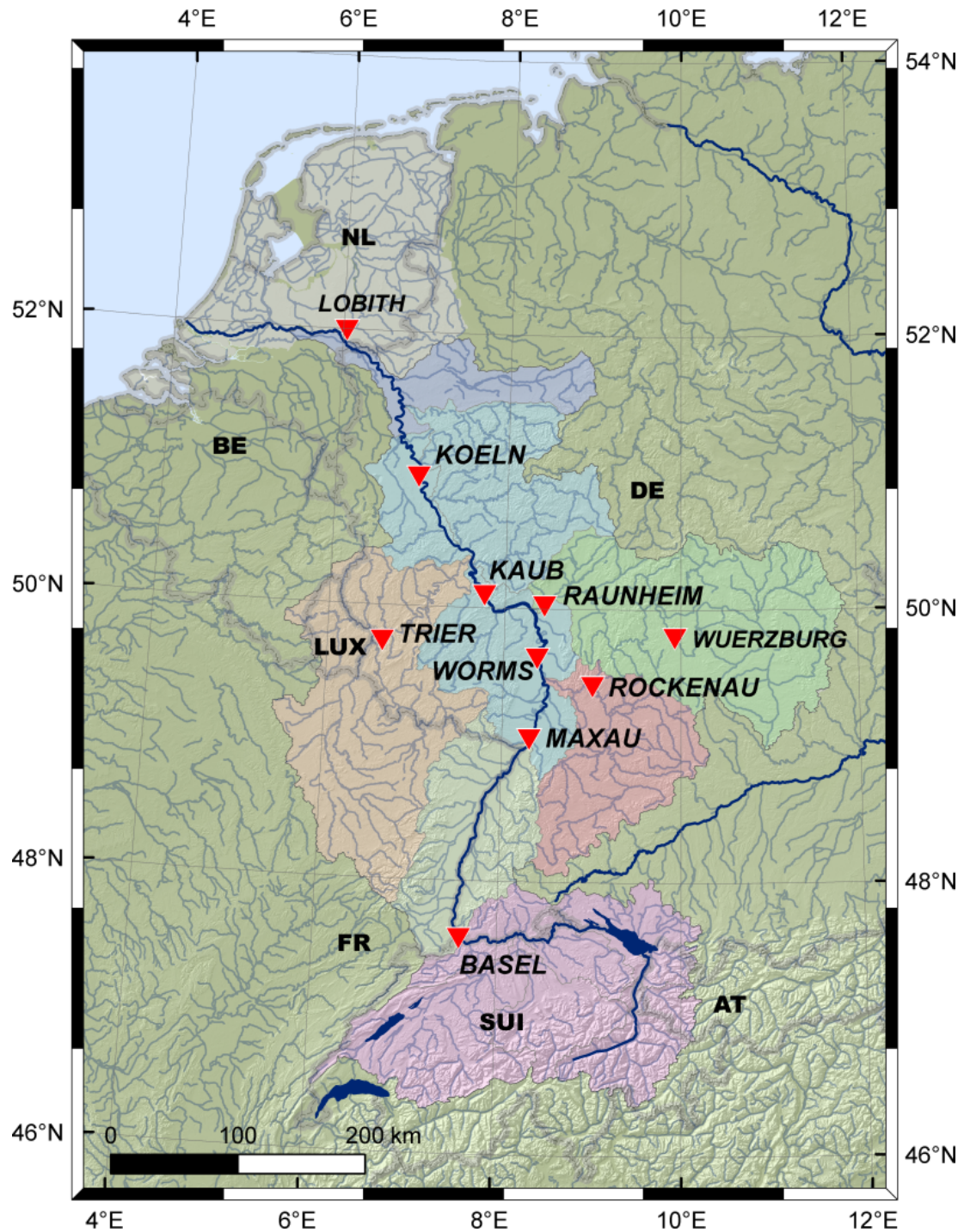


Abbildung 15: Übersichtskarte der Rheinpegel und des Einzugsgebietes (IKSR, 2011)



Abbildung 16: Karte des Elbeinzugsgebietes (Roers & Wechsung, 2015)

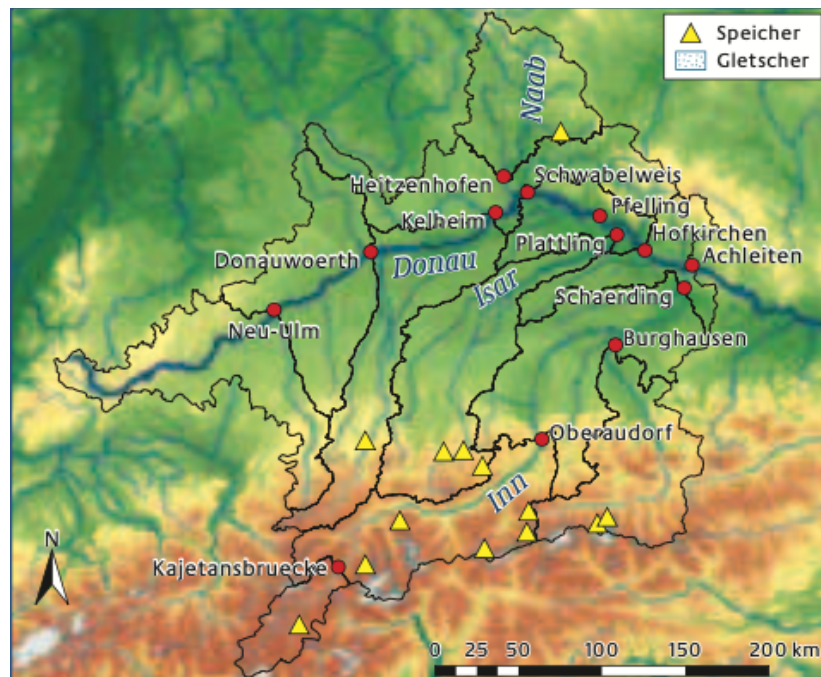


Abbildung 17: Donau Einzugsgebiet bis Pegel Achleiten (Klein, et al., 2011)